INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | MAYO 2021 | N.º 536



# INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Mayo 2021 • N.º 536 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

## El arte de la transformación

Los estudios moleculares aportan nueva luz al origen y la evolución de la metamorfosis

MEDIOAMBIENTE
**El impacto biológico de la contaminación lumínica**

ASTRONOMÍA
**La carrera por encontrar lunas extrasolares**

ARQUEOLOGÍA
**Epidemias que cambiaron el rumbo de la historia**



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Mayo 2021, Número 536


36



## ARTÍCULOS




46




INVESTIGACIÓN Y
# CIENCIA

## SECCIONES



EN PORTADA

El gusano de la seda se encierra en su capullo y emerge al cabo de unos días transformado en una mariposa. ¿Cómo lo hace? Esta pregunta, que resume la maravilla y el misterio de la metamorfosis de los insectos, ha constituido un enigma desde tiempos inmemoriales. Los datos recientes sobre los mecanismos genéticos y moleculares que controlan la metamorfosis están aportando nueva luz sobre esta peculiar forma de desarrollo. Foto: Albert Masó/Wild Images



redaccion@investigacionyciencia.es



*Marzo de 2021*

**PREDICCIÓN METEOROLÓGICA**

Me ha interesado especialmente el artículo «Pronósticos del tiempo para 28 días» [Kathy Pegion; Investigación y Ciencia, marzo de 2021] sobre los pronósticos subestacionales. Estos han llegado para quedarse: es evidente que mejorarán su fiabilidad y que se incorporarán a nuestra vida diaria igual que lo hicieron los pronósticos a corto plazo. La mayoría de nosotros consultamos las previsiones meteorológicas para programar el fin de semana y cada vez las queremos tener antes. Conocer cierto grado de pronóstico a más largo plazo nos permitiría organizar nuestro tiempo libre con mayor antelación, con las grandes implicaciones económicas que podría tener algo así en un país de turismo como el nuestro. Más allá de tales usos, estos pronósticos ayudarán a ahorrar en muchos campos, como la agricultura o las obras públicas, al permitir una planificación con mayor antelación. De hecho, actualmente ya se utilizan con la debida cautela en algunos sectores. E incluso ayudarán a predecir episodios extremos, como sequías, inundaciones o nevadas. Ello permitirá una mejor planificación y, como consecuencia, una reducción de todo tipo de riesgos.

Sin embargo, hay que tener claro que, de momento, estos pronósticos siguen sujetos a un alto grado de incertidumbre, por lo que pueden tenerse en cuenta solo como primera aproximación para preparar los posibles escenarios. Al respecto, sería interesante que contaran con la contribución de los expertos nacionales para poder añadir a los modelos las particularidades y parametrizaciones de nuestros climas, así como para poder plasmar sus predicciones a nuestro entorno más cercano.

David Pagès i Farré
*Físico*
*Barcelona*

**VACUNAS Y TRANSMISIÓN DE COVID-19**

El artículo «¿Dejará de transmitirse la COVID-19 gracias a las vacunas?» [Smriti Mallapaty; Investigación y Ciencia, abril de 2021] aborda la pregunta de hasta qué punto la vacunación conseguirá impedir la propagación del SARS-CoV-2. En él se afirma que «los análisis preliminares sugieren que algunas vacunas probablemente consigan detener la transmisión del virus. Pero no es fácil confirmar este efecto ni su contundencia, porque una caída de las infecciones en una región dada podría explicarse por otros factores, como los confinamientos y los cambios de las costumbres. Además, como los portadores asintomáticos también propagan el virus, se complica mucho la detección de dichas infecciones».

La autora incluye la opinión de varios expertos y menciona los ensayos clínicos efectuados para evaluar las vacunas, así como la intención de Pfizer de comenzar a realizar hisopados para ver si sus inyecciones consiguen bloquear la infección. También se señalan estudios que apuntan a que la carga vírica tras la vacunación «es una buena indicación de la contagiosidad» y se incluyen dos citas bibliográficas, una del 2 de febrero y otra del 8 de febrero de 2021, que refuerzan las opiniones expresadas en el artículo.

Al respecto, es interesante señalar que, unos días después de que la versión original del artículo de Mallapaty apareciera en la revista *Nature*, Noa Dagan, del Instituto de Investigación Clalit, y sus colaboradores publicaron en *The New England Journal of Medicine* un estudio que evaluaba los resultados de la campaña de vacunación en Israel. En dicho trabajo se incluyeron unas 1.200.000 personas separadas en dos grupos, uno de 600.000 individuos no vacunados y otro de 600.000 personas que habían recibido las dos dosis de la vacuna. De los resultados puede inferirse que los vacunados con la vacuna de ARNm de Pfizer reducirían su capacidad de contagio en un 92 por ciento.

Por supuesto, se trata de un solo estudio, por lo que habrá que esperar a que sus resultados se vean confirmados por otros trabajos. No obstante, se trata de un ensayo muy robusto y, posiblemente, el mayor y mejor planteado hasta la fecha.

Justo Aznar
*Observatorio de Bioética*
*Universidad Católica de Valencia*



*Abril de 2021*

## Erratum corrige

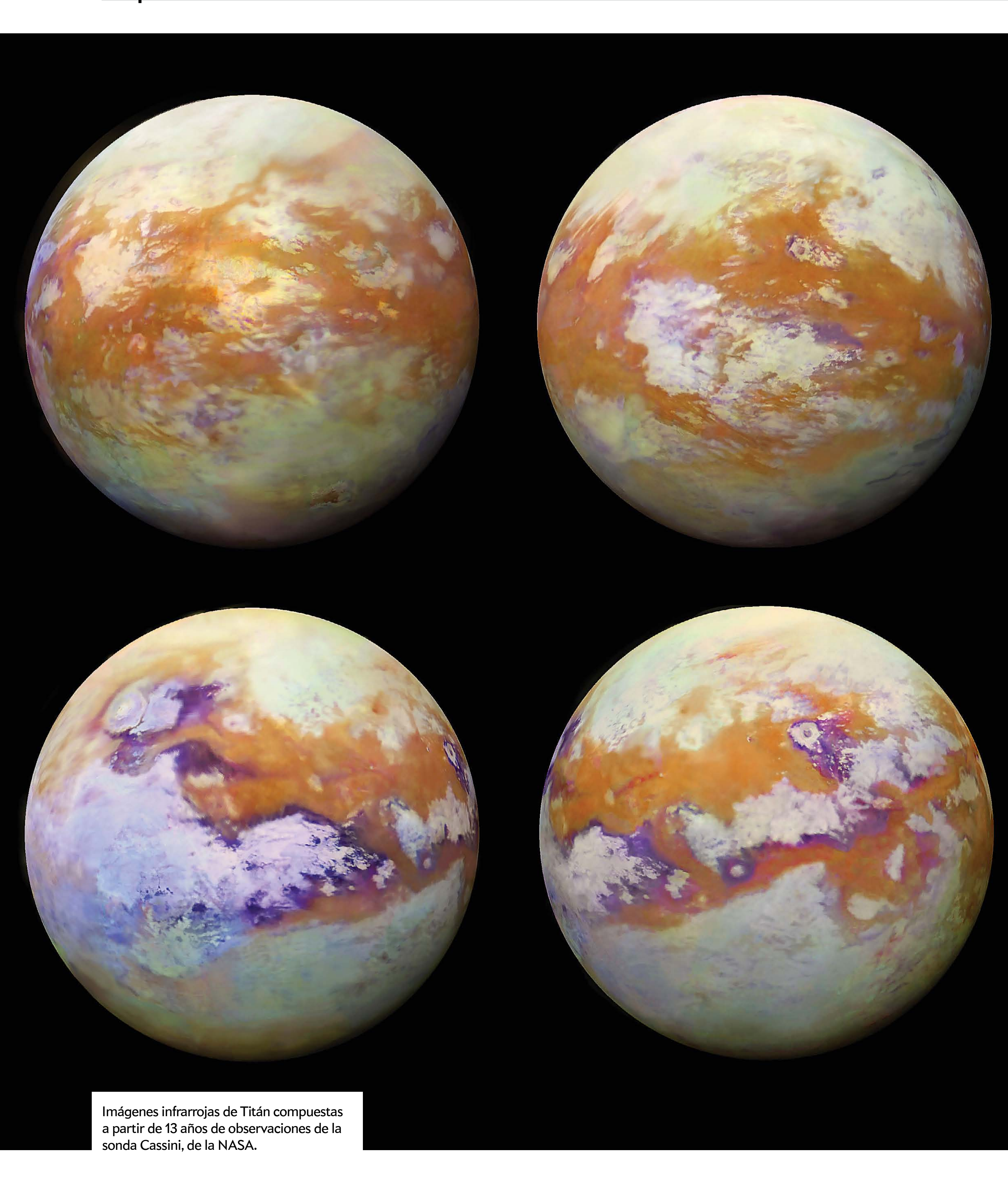
El artículo Errores y sensacionalismo en la divulgación científica [Tomás Ortín y Ángel Uranga; Investigación y Ciencia, abril de 2021] atribuye la frase «se empieza aprobando errores y se acaba siendo condescendiente con los horrores» al escritor Juan Goytisolo. Esa cita ha sido atribuida a Goytisolo en fuentes periodísticas. Sin embargo, como puntualiza nuestro colaborador Carlos Sabín, su origen más probable se remonta a una entrevista al escritor publicada en *El País* en 1988 y donde Goytisolo cita una frase muy similar del historiador francés Maxime Rodinson.

*Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.*

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



Imágenes infrarrojas de Titán compuestas a partir de 13 años de observaciones de la sonda Cassini, de la NASA.

NASA, LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO (JPL), INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA, UNIVERSIDAD DE NANTES Y UNIVERSIDAD DE ARIZONA

SISTEMA SOLAR

# Mares extraterrestres

## La mayor masa líquida de Titán es tan profunda que cubriría un rascacielos

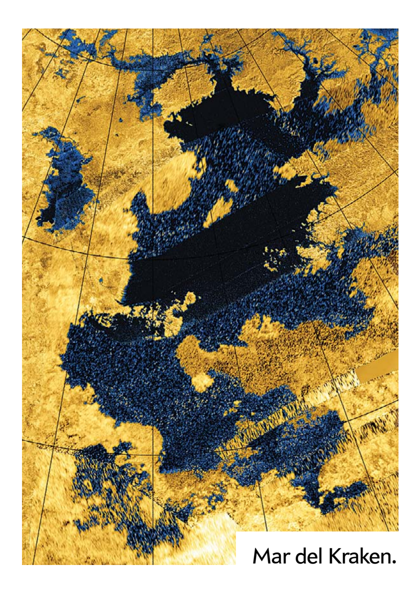
**Titán, la luna de Saturno,** es el único lugar conocido del sistema solar que —aparte de la Tierra— conserva lagos y mares en su superficie. Estos siempre han despertado enorme curiosidad entre los científicos, quienes ahora han realizado cálculos para estimar la profundidad de la mayor masa líquida de Titán: el mar del Kraken, compuesto por una gélida mezcla de metano, etano y nitrógeno.

A partir de un nuevo análisis de los datos de radar tomados por la sonda Cassini en agosto de 2014, los investigadores han calculado la profundidad de una parte del mar del Kraken donde fue posible detectar el fondo marino, así como la de otras en las que no lo fue. Allí donde se encontró un lecho (en un gran estuario situado al norte), algunas señales se reflejaron en la superficie mientras que otras penetraron en el líquido y rebotaron en el fondo marino, explica Valerio Poggiali, planetólogo de la Universidad Cornell. Esos ecos revelaron que la profundidad en esa zona era de hasta 85 metros, anuncian Poggiali y sus colaboradores en *Journal of Geophysical Research: Planets*. En cambio, en la parte central y occidental del mar no se detectó ningún eco del fondo marino. Según los autores, ello sugiere que el centro del mar del Kraken podría tener entre 100 y más de 300 metros de profundidad.

«Es emocionante poder hacer batimetría [medir la profundidad] en una luna del sistema solar exterior», señala Elizabeth Turtle, planetóloga del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins

que no participó en el estudio. Los resultados son «muy informativos y aportan datos que ayudarán a entender Titán y a planificar las misiones que mandemos allí», añade.

Los investigadores advierten de que el hecho de que algunas señales no rebotaran podría no deberse a una gran profundidad, sino a que el líquido absorbió las señales del radar, lo que implicaría que las suposiciones sobre su composición no son correctas. De acuerdo con los datos empleados por los autores, el mar del Kraken parece estar formado en un 70 por ciento por metano líquido, en un 16 por ciento por nitrógeno líquido y en un 14 por ciento por etano líquido a una temperatura de 182 grados Celsius bajo cero. Cuando Cassini lo sobrevoló, las olas apenas se alzaban unos milímetros sobre la superficie.



Mar del Kraken.

Tales mediciones batimétricas son clave para los proyectos que diseñan submarinos robóticos u otros aparatos destinados a surcar los lagos y los mares de Titán, señala Steven Oleson, ingeniero del Centro de Investigación Glenn de la NASA que tampoco participó en el estudio. Él y otros expertos han efectuado diseños preliminares de un instrumento de este tipo, aunque por ahora ninguna de las misiones que contempla la NASA incluye un submarino robótico. Conocer el mar del Kraken es esencial para entender Titán: el mar contiene en torno al 80 por ciento del líquido que hay en la superficie del satélite y abarca unos 500.000 kilómetros cuadrados, una superficie mayor que la del mar Negro.

—*Sid Perkins*

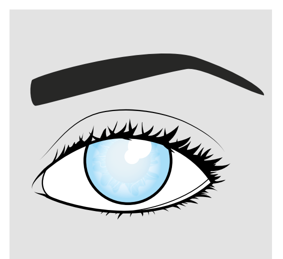
BIOINGENIERÍA

# Optogenética para curar

## Las células fotoactivadas auguran amplias posibilidades terapéuticas

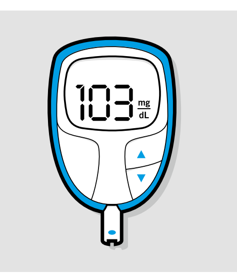
**La optogenética** está revolucionando las neurociencias. La técnica implica la alteración genética de ciertos tipos de células para que produzcan proteínas fotosensibles; de ese modo es posible activar las células mediante pulsos de luz que, aplicados a través de un cable de fibra óptica, viajan al cerebro. Esto ya ha dotado a los investigadores de una capacidad sin parangón para escrutar los circuitos neuronales que rigen las funciones cerebrales en los animales, pero algunos han dado un paso más allá y trabajan en aplicaciones terapéuticas humanas.

—*Simon Makin*



### Tratamiento contra la ceguera

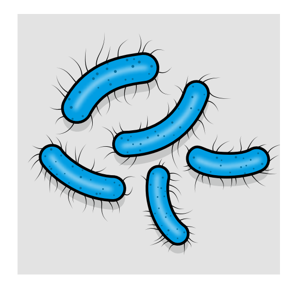
La optogenética ofrece un enfoque flexible para tratar, y posiblemente curar, la ceguera. Las células fotorreceptoras de la retina están dotadas de proteínas fotosensibles, las opsinas, con las que convierten la luz que incide en el ojo en señales eléctricas. Si estas células fallan (una causa habitual de pérdida de la visión), los investigadores pueden usar virus para introducir los genes de las opsinas en las células deseadas, bien para restaurar la sensibilidad a la luz de los fotorreceptores, bien para convertir en fotosensibles otros tipos de células retinianas. El proceso permitiría en teoría tratar la ceguera motivada por múltiples causas y grados de degeneración retiniana. En el laboratorio funciona, y también están en marcha numerosos ensayos clínicos con pacientes sobre sistemas de ese tipo. En algunos experimentos se recurre a cámaras y gafas especiales para proyectar longitudes de onda e intensidades de luz optimizadas para la opsina escogida, pero también se está ensayando con opsinas que responden a la luz directa.




### Regulación de la glucemia en la diabetes

Un equipo encabezado por el bioingeniero Martin Fussenegger, de la Universidad de Basilea, está manipulando por medio de la optogenética la expresión génica con el propósito de regular la concentración de glucosa en la sangre de ratones diabéticos. En un estudio de 2011, el equipo genomodificó células para que respondiesen a la luz azul mediante la expresión de una proteína que regula la glucemia.

«Fue el primer ejemplo de control real de esos genes. La luz y la expresión génica mantuvieron un vínculo directo», explica Fussenegger. Sus experimentos indican que los ratones a los que les implantaron las células genomodificadas y trataron a continuación con luz mostraron niveles más altos de insulina y menos sensibilidad a la glucosa. En 2017, él y sus colaboradores describieron la implantación de LED alimentados por ondas, combinados con las células genomodificadas en un sistema semiautomático controlable con un teléfono móvil inteligente. Desde entonces trabajan para refinar la técnica.



### Control de la microbiota intestinal

La comunidad microbiana intestinal es sumamente compleja por los billones de microbios que la integran, la mayoría con funciones desconocidas. Un equipo dirigido por Meng Wang, genetista del Colegio Baylor, ha descrito hace poco en ***eLife*** el uso de la optogenética para observar el vínculo entre la microbiota y la salud. Modificaron bacterias de *Escherichia coli* para que estimulasen o reprimiesen la producción de ácido colánico al ser iluminadas alternativamente con luz verde o roja.

Wang ya había comprobado antes que dicho ácido protege las células del estrés y alarga la vida, por lo menos en los gusanos. En los nuevos experimentos, los gusanos portadores de las bacterias modificadas vivieron más cuando estuvieron expuestos a la luz verde. Pero la aplicación médica de la técnica aún tardará. «El principal escollo radica en cómo hacer llegar la luz. De momento es más bien una herramienta experimental, que nos permite someter el microbioma a un control preciso para estudiar sus vínculos con la salud», matiza Wang.

NASA, JPL-CALTECH, AGENCIA ESPACIAL ITALIANA Y USGS (*mar del Kraken*); BROWN BIRD DESIGN (*ilustraciones*)

BIOLOGÍA CELULAR

# Un individuo nuevo cada 80 días

## El recambio celular es vasto y rápido

**El cuerpo humano** reemplaza sin cesar sus células. Científicos del Instituto Weizmann de Ciencias, en Rejóvot, han logrado por fin determinar con precisión el ritmo y la extensión de esta renovación. Más o menos una tercera parte del peso corporal corresponde al líquido externo que baña las células, como el plasma sanguíneo, y a materia sólida, como los minerales de calcio, que actúan de soporte en los huesos. Las otras dos terceras partes corresponden a los 30 billones de células humanas. Alrededor del 72 por ciento de ellas (proporción en masa) forman la grasa y la musculatura y tienen una vida media de 12 a 50 años, respectivamente. Pero poseemos muchísimas más, como las diminutas células de la sangre, que apenas viven de 3 a 120 días, o las que tapizan el intestino, que suelen vivir menos de una semana. Ambos grupos constituyen la inmensa mayoría del recambio. Cada día se renuevan en torno a 330.000 millones de células, una cantidad equivalente al 1 por ciento del total. En el plazo de 80 a 100 días se sustituyen 30 billones, que equivalen a un nuevo individuo.

*—Mark Fischetti*

### Las células del cuerpo

**Masa** Alrededor del 25 por ciento de la masa corporal es líquido externo que baña las células, como el plasma sanguíneo; otro 7 por ciento corresponde a sustancias sólidas, como los minerales. El restante 68 por ciento está constituido por las células del cuerpo humano.

25 %
7 %
68 %

**Cantidad*** Un varón de 70 kilogramos posee unos 30 billones de células humanas. Las células musculares y adiposas son grandes y suponen el 75 por ciento de la masa celular, pero solo el 0,2 por ciento del total de las células. En torno al 87 por ciento de ellas son hematíes (glóbulos rojos), sumamente pequeños.

Cada rectángulo representa un 1 por ciento de los 30 billones de células. Ese porcentaje equivale *grosso modo* a la cantidad de células que el cuerpo elimina y produce cada día.

**Tipos de células**

Sanguíneas
- Hematíes
- Linfocitos
- Neutrófilos
- Monocitos

- Endoteliales (vasos)
- Pulmonares
- Hepatocitos
- Epiteliales digestivas
- Cutáneas
- Cerebrales
- Adipocitos (grasa)
- Miocitos (músculo)
- Otras

* Esta investigación se basa en una persona promedio de referencia, que tradicionalmente se ha definido como un varón de entre 20 y 30 años y 70 kilogramos de peso. Las células perdidas o ganadas en la menstruación femenina no se han tenido en cuenta.

† El cuerpo humano alberga otros 38 billones de bacterias y muchos más virus, pero solo pesan 200 o 300 gramos y no se consideran humanos.

### El recambio celular diario

**En cantidad†** Cada día se renuevan unos 330.000 millones de células (+/–20.000 millones). Cerca del 86 por ciento son hematíes y el 12 por ciento células intestinales. Otras células son reemplazadas con suma lentitud.

**En masa** Alrededor del 49 por ciento son hematíes, el 41 por ciento son células del intestino, las células cutáneas representan el 4 por ciento, las adiposas otro 4 por ciento y las musculares el 1 por ciento. El recambio diario asciende a 80 gramos (+/–20).

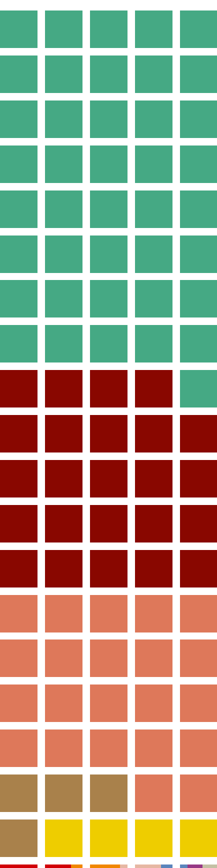
**Las células pequeñas mandan** Como las células grandes suelen vivir más, el recambio diario está dominado por una vasta multitud de células pequeñas, cuya vida es muy breve.

Hematíes
Masa: 0,09 nanogramos (ng)
Tiempo de vida: 120 días

Células epiteliales del colon
1 ng
3,4 días

Músculo
1000–10.000 ng
30–70 años

La mayoría de las células del corazón, los ojos y el encéfalo duran toda la vida.



FUENTES: «REVISED ESTIMATES FOR THE NUMBER OF HUMAN AND BACTERIA CELLS IN THE BODY». RON SENDER, SHAI FUCHS Y RON MILO EN *PLOS BIOLOGY*, VOL. 14, AGOSTO DE 2016 (*datos del total de células*); «THE DISTRIBUTION OF CELLULAR TURNOVER IN THE HUMAN BODY». RON SENDER Y RON MILO EN *NATURE MEDICINE*, VOL. 27, ENERO DE 2021 (*datos del recambio celular*). JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

VULCANOLOGÍA

# Erupciones de barro

## Así se comporta un volcán de lodo ultraexplosivo


El inestable volcán de lodo Lokbatan, en Azerbaiyán.

**No todos los volcanes** escupen lava: algunos arrojan fango, y lo hacen en grandes cantidades. Aunque la mayoría de los volcanes de lodo expulsan algo de barro solo de vez en cuando, hay uno bien conocido por sus frecuentes y potentes explosiones. Ahora, un trabajo reciente ha conseguido explicar por qué se producen esas erupciones y cuán intensas pueden llegar a ser.

Adriano Mazzini, geólogo de la Universidad de Oslo, y sus colaboradores estudiaron el Lokbatan, un volcán de lodo ubicado en Azerbaiyán. Mazzini llama a este pequeño país situado al norte de Irán «el reino de los volcanes de fango». Posee cientos de ellos, pero el Lokbatan es excepcional.

La primera erupción registrada tuvo lugar en 1829. Desde entonces, aproximadamente cada cinco años ha lanzado columnas de lodo, a veces de más de 100 metros de altura. Durante las erupciones suele producirse la combustión espontánea de los depósitos de petróleo y metano cercanos, de modo que los surtidores de lodo suelen ir acompañados de llamas y humo. El espectáculo compite con el de un volcán tradicional alimentado por magma, asegura Mazzini: «Pueden ser igual de llamativos y potentes».

Para investigar las impresionantes erupciones del Lokbatan, Mazzini y sus colaboradores instalaron 30 detectores de gas en los flancos del volcán a fin de estudiar las emisiones de metano y dióxido de carbono. Sospechaban que los gases se acumulaban más deprisa bajo el Lokbatan que en otros volcanes de lodo que liberan gas a la atmósfera de forma continua.

Los autores hallaron que el Lokbatan se «desgasifica» a un ritmo más de cien veces menor que el de otro volcán de lodo próximo. Cuando entra en erupción, el gas escapa violentamente y después el barro vuelve a caer en la chimenea del volcán, con lo que la sella. Según Mazzini, ese lodo se compacta y forma un tapón que atrapa el gas, el cual se acumula hasta que provoca la siguiente erupción explosiva.

MEDICINA FORENSE

# Pistas en la sangre

## Un innovador sistema esclarecería indicios en el mismo lugar de los hechos

**Un conductor somnoliento** circula por una carretera oscura cuando, de improviso, oye un fuerte «¡bum!» y encuentra después una salpicadura de sangre en el parachoques delantero. O la policía descubre una mancha de sangre tan diminuta como sospechosa en la escena de un crimen. Averiguar con celeridad si los restos son de origen humano o animal es crucial, pero a veces los análisis se demoran días y comportan la destrucción de pruebas valiosas. Una nueva técnica podría ofrecer una solución a ambos problemas, según sus creadores.

Igor Lednev y Ewelina Mistek-Morabito, especialistas en química forense de la Universidad Estatal de Nueva York en Albany, han aunado la espectroscopía y la estadística en un método rápido y conservador destinado a reconocer la sangre humana. Proyectaron luz infrarroja sobre muestras de sangre seca, bien humana, o bien procedente de diez animales. Entre estos había especies domésticas, como perros, gatos o hurones, y especies silvestres, como ciervos y alces, todas implicadas a menudo en colisiones con vehículos. A continuación analizaron la luz reflejada, cuyo espectro varía en función de la composición sanguínea, y con esos datos entrenaron un algoritmo de aprendizaje automático para diferenciar con rapidez y precisión la sangre humana de la animal.



Mistek-Morabito explica que «la técnica ayudaría a acotar las muestras pertinentes para el caso, antes de remitirlas al laboratorio de análisis de ADN». La policía científica y los peritos forenses emplean actualmente análisis bioquímicos destructivos para distinguir la sangre humana de la animal, métodos que, además, no son infalibles. Pendientes de contrastar la fiabilidad del nuevo sistema sobre el terreno, la inventora califica de alentadores los resultados preliminares.

Publicado en *Communications Chemistry*, en el estudio emplearon un instrumento analítico de sobremesa, pero Lednev trabaja ahora en su adaptación a un dispositivo manual y portátil. Concibe un práctico espectroscopio multifuncional, con el que algún día se identificarán en el acto los restos de líquidos corporales. «Los instrumentos portátiles representan el futuro, pues nos ayudarán a llevar el laboratorio a la escena del crimen», asegura Mistek-Morabito.

ANDREY SHEVCHENKO/ALAMY STOCK PHOTO (*volcán*); THOMAS FUCHS (*pistas en la sangre*)

Asimismo, los investigadores creen que las erupciones del Lokbatan probablemente hayan sido lo bastante violentas para destruir el borde del cráter. Observaron tres descomunales trozos de sedimento (el mayor de ellos, con un volumen superior al de 300 vagones de tren) al oeste del volcán, donde es notorio que faltan partes del borde del cráter principal. Esos «megabloques» serían pedazos del cráter que se desprendieron en una erupción. Los investigadores emplearon modelos informáticos para demostrar que los enormes fragmentos pudieron haberse deslizado varios kilómetros cuesta abajo montados sobre una gruesa capa de lodo fluido. Los registros históricos sugieren que eso pudo ocurrir durante una erupción acaecida en 1887, según los resultados del estudio, publicado en *Earth and Planetary Science Letters*.

Entender la dinámica de los volcanes de lodo puede aportar ideas sobre lo que sucede en otros planetas, incluido Marte, afirma Shirin Haque, astrobióloga de la Universidad de las Indias Occidentales en Trinidad y Tobago que no participó en la investigación. Es posible que el planeta rojo posea varios volcanes de fango, y «esos flujos de lodo podrían haber afectado al paisaje que vemos hoy en Marte», concluye la experta.

*—Katherine Kornei*

---

«Este estudio nos indica que un método de análisis de muestras no destructivo sería viable», comenta Peter Massey, perito forense de la Universidad del Sur de Florida, ajeno al proyecto. Pero advierte que, para ser práctico, el aparato debe ser compacto, de uso sencillo y asequible.

Las técnicas espectroscópicas parecen prometedoras porque se prestan a una miniaturización similar a la de un teléfono móvil, afirma Matthieu Baudelet, químico forense de la Universidad de Florida Central, que tampoco ha participado en la investigación. Ahora bien, como el proceso de aprendizaje automático no revela razones fisiológicas concretas para las diferencias en los espectros, Baudelet se pregunta si dará resultado con la sangre de animales silvestres, con hábitos alimentarios y estados de salud variopintos.

De cara a su puesta en práctica, los creadores ensayarán y calibrarán la técnica con muestras de diversidad creciente; con ese fin Lednev colabora en este momento con especialistas de la Red de Laboratorios de la Policía Científica del Estado de Nueva York para validarla en condiciones reales.

*—Harini Barath*

MEDICINA

# Alerta de trasplante cardíaco fallido

## Una prueba de ADN detectaría pronto el riesgo de rechazo

**Recibir un corazón** no es un trance que acabe al salir del quirófano. Durante los meses posteriores a la operación el sistema inmunitario del paciente puede atacar el órgano trasplantado, en ocasiones con consecuencias funestas. Los médicos vigilan la inflamación, un signo de rechazo, recortando y analizando pequeños pedazos de tejido del nuevo órgano, normalmente 16 veces el primer año. «No están exentas de riesgo y los resultados distan de ser fiables, pero las biopsias son el mejor método de que disponemos hasta hoy», afirma la investigadora de medicina cardiovascular Hannah Valantine, de la Universidad Stanford.

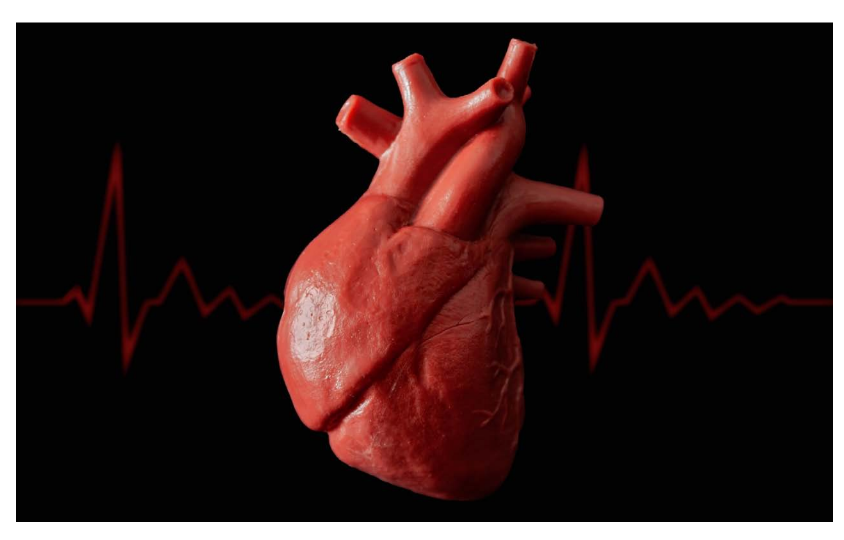
Un nuevo análisis de sangre basado en el ADN concedería un tiempo precioso para prevenir el rechazo precoz y súbito del trasplante cardíaco y, según un estudio publicado en *Circulation*, reduciría la cantidad de biopsias en torno a un 80 por ciento.

Para cada trasplante analizado en el estudio, Valantine y los demás autores tomaron muestras de sangre para descubrir pequeñas diferencias genéticas entre el donante y el receptor. Midieron el porcentaje de ADN procedente del donante que contenía el plasma sanguíneo del receptor. Las células dañadas o moribundas del corazón trasplantado liberan más fragmentos de ADN que las sanas, de modo que los niveles elevados de ADN del donante advertirían del peligro de rechazo. Gracias a esta alerta precoz, los médicos podrían iniciar el tratamiento farmacológico antes de que fuese demasiado tarde para revertir la situación. En el estudio se analizaron muestras de sangre de 171 trasplantados recientes y descubrieron que el rechazo es probable cuando se detecta más de un 0,25 por ciento de ADN del donante. La prueba ofreció una señal inequívoca y detectó los primeros indicios de rechazo al menos tres meses antes que las biopsias de tejido. También reveló signos iniciales de un tipo especialmente pernicioso de rechazo que no siempre detectan las biopsias, el rechazo mediado por anticuerpos.

Cerca del 44 por ciento de los pacientes trasplantados del estudio eran de raza negra. Este hecho reviste especial importancia, asegura Valantine, pues son numerosos los estudios que señalan un elevado riesgo de rechazo con órganos de todo tipo en los afroamericanos.

Por prometedor que parezca el ensayo, serán necesarios estudios de viabilidad clínica a largo plazo donde se evalúe el resultado de los tratamientos escogidos en virtud de la prueba, afirma Scott Trebbutt, investigador médico de la Universidad de la Columbia Británica, que no ha formado parte del equipo. En su opinión, las pruebas no invasivas son inestimables, y «reducir el número de biopsias, aunque sea a la mitad, mejoraría notablemente la calidad de vida de los trasplantados».

*—Harini Barath*



GETTY IMAGES/MOUSSA81/ISTOCK

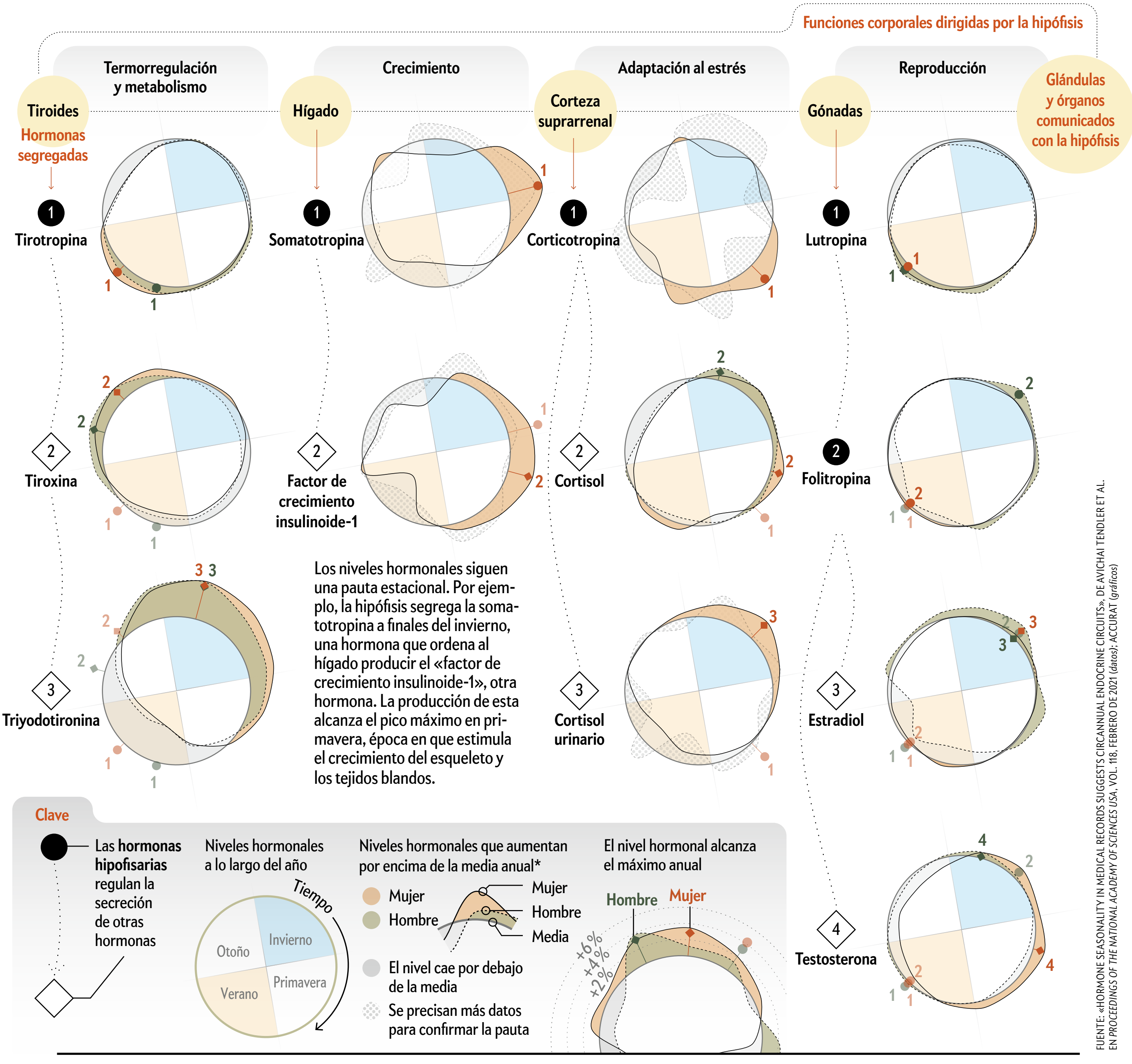
FISIOLOGÍA HUMANA

# Las cuatro estaciones de las hormonas

## Un reloj corporal interno regula un ciclo anual de máximos y mínimos hormonales

**Las hormonas aumentan y disminuyen** en cuestión de minutos como parte del control de nuestras actividades cotidianas: sueño, digestión, reacciones al estrés, etcétera. Y a lo largo del año, sus niveles generales también ascienden y descienden levemente. Un nuevo trabajo indica que las variaciones siguen una especie de memoria estacional regulada por un reloj interno recién descubierto. Gracias al estudio de millones de análisis de sangre, investigadores del Instituto Weizmann de Ciencias en Rejóvot han descubierto que el tamaño de las glándulas endocrinas, productoras de hormonas, crece y mengua siguiendo ciclos anuales autorregulados y continuos.

Cada máximo y cada mínimo hacen que los niveles de hormonas suban y bajen varios puntos porcentuales, una variación pequeña pero significativa, a menudo con un desfase de varios meses. Los ciclos y los períodos de latencia resultan evidentes en las hormonas que son segregadas por la glándula tiroides, el hígado, la corteza suprarrenal y las gónadas, bajo la batuta de la glándula pituitaria, o hipófisis, ubicada en el cerebro. Los resultados refuerzan las pruebas, cada vez más numerosas, de que la fecundidad tiende a aumentar a mediados de invierno, los niños crecen más rápido en primavera y los cambios de humor se acentúan en otoño. *—Mark Fischetti*




**Las curvas enlazan los valores medios a mitad de mes. Todas las muestras se normalizaron para la edad del individuo y el momento del día en que se tomó la muestra. El análisis no incluyó ninguna categoría que no fuera binaria.*



Cíclidos del este de África.

GENÉTICA

## Genios de la especiación

Cómo lograron los cíclidos diversificarse de forma tan vasta y tan rápida

**Tal vez los pinzones de Darwin** sean el ejemplo más conocido de radiación adaptativa: el fenómeno evolutivo por el cual una especie ancestral se diversifica con rapidez en otras nuevas, cada una dotada de adaptaciones únicas para sobrevivir en su entorno. Pero esos pájaros de las Galápagos palidecen ante los cíclidos de África oriental. En el mismo lapso de dos o tres millones de años que tardaron en aparecer las 14 especies de pinzones, más de mil tipos de cíclidos surgieron a partir de un ancestro común, y eso solo en el lago Malaui. Nuevas investigaciones están revelando los mecanismos genéticos que se ocultan tras esa diversificación tan vasta y acelerada.

Los cíclidos exhiben una variedad extraordinaria de formas, colores, aparatos bucales, conductas y dietas, entre otros rasgos. «A simple vista parecen radicalmente distintos, pero cuando uno compara sus genes [codificantes de proteínas] halla muy poca diversidad», asegura Tarang Mehta, biólogo evolutivo del Instituto Earlham.

Los genes codificantes influyen en los rasgos básicos del organismo. Anteriores investigaciones ya habían revelado que las secuencias de ADN «no codificantes» o «reguladoras» (que determinan el modo, el momento y el lugar donde los genes se activan y se desactivan) evolucionaron más rápido que sus genes codificantes de proteínas. Estos tramos reguladores permiten que el mismo conjunto de piezas del rompecabezas genético encajen entre sí en miles de configuraciones distintas, un fenómeno que Mehta denomina «retocado». Pero los científicos dudaban de que tales retoques pudieran impulsar la evolución de nuevas especies.

En un estudio publicado en *Genome Biology*, Mehta y sus colaboradores analizaron la expresión génica en el cerebro, el ojo, el corazón, el riñón, el tejido muscular y los testículos de cinco cíclidos de los ríos y lagos de África oriental. Con un modelo informático diseñado por ellos, observaron que los cambios en las regiones no codificantes del genoma aportaban una «parte sustancial del sustrato evolutivo en las adaptaciones» que llevaron a la divergencia, afirma Federica Di Palma, bióloga de la Universidad de Anglia del Este y una de las autoras del estudio. El equipo comprobó, por ejemplo, que las variaciones de las secuencias reguladoras alteraron la expresión de ciertos genes codificantes y eso facilitó la adaptación de los cíclidos a condiciones concretas. Cuando las especies compartían una alimentación o un hábitat similares, tenían más probabilidades de experimentar cambios similares en esas redes reguladoras.

A muchos biólogos les preocupa la pérdida acelerada de biodiversidad que afecta al planeta, pero la ciencia todavía no conoce plenamente los procesos de diversificación biológica en primera instancia, explica el zoólogo de la Universidad de Basilea Walter Salzburger, que no ha participado en el estudio. Los cíclidos de los lagos Malaui, Tanganika y Victoria ofrecen una oportunidad única para ahondar en ese proceso, añade.

El equipo de Mehta está aplicando el mismo tipo de análisis a las tilapias, un grupo de cíclidos al que pertenece la segunda especie piscícola más criada en el mundo. Si descubren el retocado del genoma que está asociado con rasgos como la adaptación a la salinidad o las temperaturas extremas, afirma Mehta, tal vez sería posible mejorar la cría de la tilapia para alimentar con mayor eficiencia a un mundo hambriento.

*—Jason G. Goldman*

JAVIER MILLÁN PHZOTOGRAPHY, GETTY IMAGES

FÍSICA DE PARTÍCULAS

# ¿Se ha roto el modelo estándar?

Un esperado experimento anuncia que el momento magnético del muon se desvía de la predicción teórica de consenso, aunque un cálculo recién publicado rebaja las expectativas

*DAVIDE CASTELVECCHI*

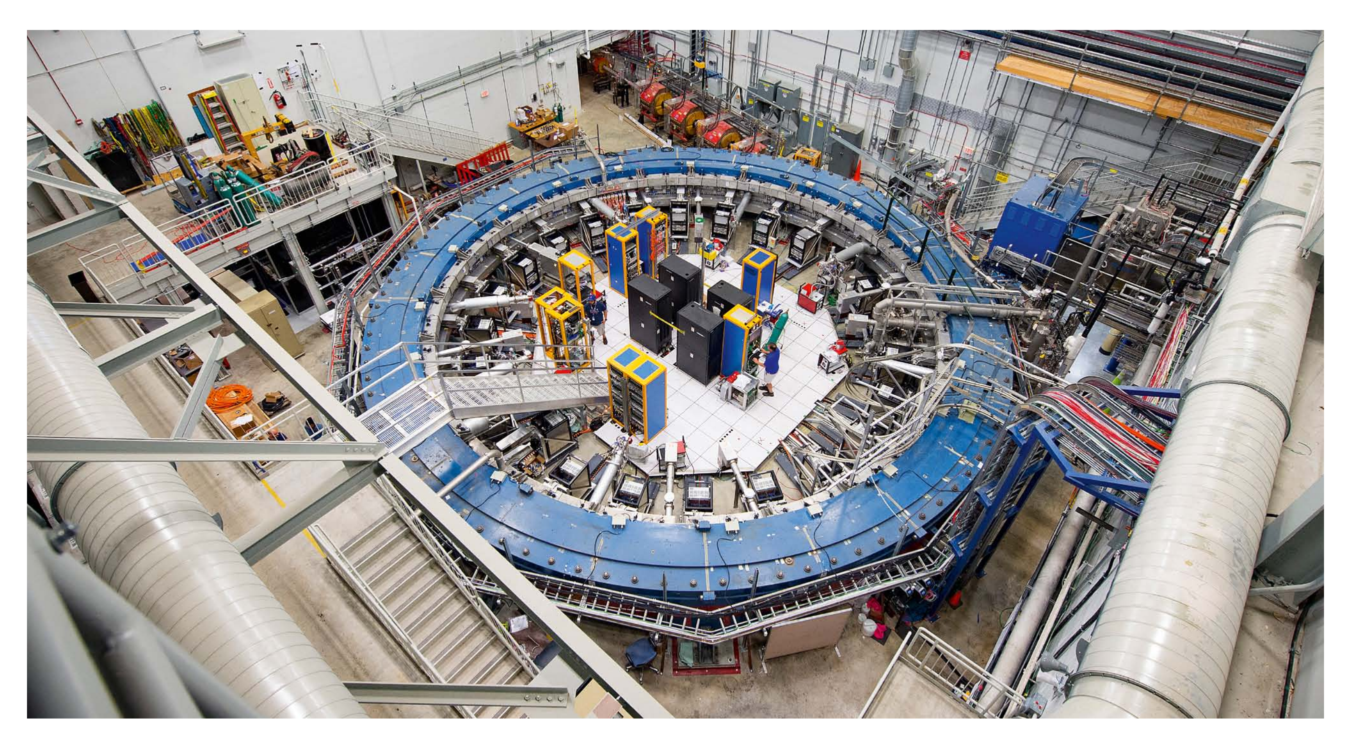


IMAGEN DEL EXPERIMENTO Muon *g* – 2 en el Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi (Fermilab), cerca de Chicago.

REIDAR HAHN/FERMILAB

Los muones siguen comportándose de manera extraña. Un experimento en Estados Unidos ha confirmado un hallazgo previo según el cual esta partícula (muy similar al electrón, pero inestable y más masiva) sería más magnética de lo esperado. Si el resultado sobrevive el paso del tiempo, podría revelar la existencia de nuevas partículas elementales, algo que supondría toda una revolución en física teórica.

La colaboración Muon *g* – 2, del Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi (Fermilab), cerca de Chicago, anunció sus últimos hallazgos en una videoconferencia el 7 de abril. Los resultados, publicados en *Physical Review Letters*, son «extremadamente alentadores» para quienes esperan descubrir nuevas partículas, afirma Susan Gardner, física de la Universidad de Kentucky en Lexington.

Los primeros datos anómalos sobre el magnetismo del muon fueron obtenidos en 2001 en una versión previa del experimento ubicada en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Nueva York, cuyos resultados finales se publicaron en 2006. Las mediciones hacen referencia al momento magnético del muon: una propiedad de la partícula que hace que esta se comporte como un pequeño imán. El modelo estándar de la física de partículas predice que, en las unidades adecuadas, dicho momento magnético debería ser un número muy próximo a 2. En Brookhaven los físicos midieron esa diferencia, conocida como *g* – 2, y hallaron que era mayor de lo que predecía la teoría.

El interés por este parámetro se debe a que, en el caso de una partícula elemental, el valor de su momento magnético se ve modificado por los efectos de las partículas virtuales (versiones efímeras de las partículas reales que aparecen y desaparecen constantemente en el vacío cuántico). Para predecir dicho valor, los físicos deben efectuar laboriosos cálculos que incluyan las contribuciones virtuales de todas las partículas conocidas. Si los datos experimentales difieren de manera apreciable de la predicción teórica, eso supondría un indicio de la existencia de nuevas partículas elementales en la naturaleza. En 2001, los resultados del experimento de Brookhaven hicieron pensar a muchos físicos que esas nuevas partículas no tardarían en dejar su impronta en otros experimentos.

**Un experimento «ciego»**

Para verificar los resultados obtenidos en su día en Brookhaven, los investigadores construyeron una nueva versión del experimento en las instalaciones del Fermilab. El dispositivo, que hace circular muones por un anillo de 15 metros de diámetro dotado de imanes superconductores, comenzó sus operaciones en 2017. Los resul-

tados presentados ahora corresponden al primer año de toma de datos.

Para evitar sesgos en el análisis, los físicos ocultaron deliberadamente el valor de un parámetro clave del experimento: la frecuencia de un reloj digital presente en la instalación. Solo dos físicos del Fermilab que no formaban parte de la colaboración conocían su valor. Como consecuencia, durante todo el proceso experimental los investigadores se vieron obligados a registrar los datos en un gráfico cuyos ejes tenían una escala incierta, lo que les impedía inferir el verdadero valor experimental del momento magnético del muon.

El 25 de febrero, en una videoconferencia en la que participaron la mayoría de los más de 200 miembros de la colaboración, los dos codirectores del experimento abrieron un sobre que contenía la frecuencia secreta del reloj. Cuando introdujeron ese número en los ordenadores, estos revelaron el verdadero resultado del experimento. En aquel momento se hizo obvio que la medición era compatible con la obtenida en Brookhaven veinte años atrás.

«El acuerdo es excelente», afirma Lee Roberts, físico de la Universidad de Boston en Massachusetts y uno de los miembros del experimento original. «La gente comenzó a aplaudir y a saltar, al menos hasta donde lo permite [una videoconferencia por] Zoom». Las reacciones de alegría eran evidentes a pesar de que muchos de los participantes tenían su micrófono silenciado, recuerda Brynn MacCoy, de la Universidad de Washington en Seattle. Según Roberts, el nuevo resultado valida el del experimento original.

Otros físicos están de acuerdo. Para Gino Isidori, físico teórico de la Universidad de Zúrich, los nuevos datos dan «una respuesta bonita y clara» al enigma planteado por los resultados anteriores. «Aquel experimento era correcto», asegura.

Pero, aunque la diferencia entre los resultados teóricos y los experimentales ha aumentado su significación estadística, todavía no constituye una prueba inequívoca de la existencia de nuevas partículas. «Quienes eran escépticos probablemente lo seguirán siendo», apunta Isidori. «En este momento, la pelota está en el tejado de los teóricos», añade.

## La incógnita de la predicción teórica

La predicción teórica más aceptada para el momento magnético del muon es un valor «de consenso» que fue publicado el año pasado. Sin embargo, otro trabajo publicado en *Nature* el 7 de abril (el mismo día que Fermilab anunció sus resultados) sugiere que la diferencia entre el valor experimental y las predicciones teóricas podría ser mucho menor de lo esperado.

Por lo que respecta al cálculo teórico, la parte más difícil de evaluar es la asociada a las contribuciones virtuales de los quarks, los constituyentes básicos del protón y el neutrón. Por esa razón, la manera tradicional de incorporar tales contribuciones en las estimaciones teóricas del momento magnético del muon se ha basado en usar datos experimentales obtenidos en otras instalaciones de física de partículas.

En el trabajo publicado ahora en *Nature* (ya conocido por la comunidad, puesto que su versión preliminar apareció en el repositorio de prepublicaciones arXiv en febrero de 2020), Zoltan Fodor, de la Universidad Estatal de Pensilvania, y sus colaboradores calcularon desde cero la contribución asociada a los quarks gracias a una técnica de simulación computacional conocida como «cromodinámica cuántica en el retículo» (*lattice QCD*). En el pasado, dicho método no se había usado en las estimaciones teóricas ya que no gozaba de la precisión requerida. Sin embargo, Fodor y sus colaboradores lograron mejorar la técnica, gracias a lo cual han obtenido un valor teórico para el momento magnético del muon que supera al valor de consenso y que se acerca mucho más al resultado experimental.

En estos momentos, otros grupos que trabajan en cromodinámica cuántica en el retículo están intentando igualar esa precisión a fin de que los resultados puedan añadirse al valor teórico de consenso, explica Aida El-Khadra, física teórica de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. «Las demás colaboraciones están trabajando para reducir sus errores, lo que requiere importantes recursos computacionales», afirma.

## ¿El primer fallo del modelo estándar?

Por ahora, la colaboración Muon *g* – 2 sigue tomando datos y analizándolos. Los investigadores esperan que, en última instancia, la precisión de sus mediciones se multiplique por cuatro. Si la discrepancia entre la teoría y el experimento se confirma, será necesario revisar el modelo estándar para incluir nuevas partículas. Sin embargo, un problema es que muchas de las posibles partículas que en su momento se pensó que podían estar inflando el momento magnético del muon han sido descartadas por otros experimentos; en particular, por el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN.

Siguen existiendo varias propuestas teóricas para explicar el momento magnético anómalo del muon, pero muchos físicos las consideran artificiosas. «No veo ninguna explicación que destaque por ser más elegante o convincente que las demás», opina Dominik Stöckinger, físico teórico de la Universidad Técnica de Dresde y miembro de la colaboración Muon *g* – 2.

Desde que acabara de formularse allá por los años setenta del siglo pasado, el modelo estándar de la física de partículas ha superado todas y cada una de las pruebas experimentales a las que ha sido sometido. Pero los físicos saben que se trata de una teoría incompleta, y algunos albergan la esperanza de que sean los muones los que saquen a la luz su primer fallo. «Si confirmamos una diferencia con las predicciones del modelo estándar, habremos conseguido lo que la gente lleva buscando cincuenta años», concluye Roberts.

***Davide Castelvecchi*** *es periodista científico especializado en física, astronomía y matemáticas.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 592, pág. 333, 2021.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

**PARA SABER MÁS**

Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.46 ppm. Colaboración Muon *g* – 2 en *Physical Review Letters*, vol. 126, art. 141801, 7 de abril de 2021.
Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD. Sz. Borsanyi et al. en *Nature*, 7 de abril de 2021.

**EN NUESTRO ARCHIVO**

¿Indicios de nueva física en el LHC? Joaquim Matias en *IyC*, agosto de 2017.
Medir la belleza. Guy Wilkinson en *IyC*, enero de 2018.
Rompecabezas hiperfino. Jean-Philippe Karr en *IyC*, febrero de 2018.

GENÉTICA

# Incógnitas resueltas desde la publicación del genoma humano, hace 20 años

## La identificación de muchas de las lagunas de la secuencia original ha ofrecido detalles relevantes sobre la estructura y la función de nuestro genoma

*KAREN H. MIGA*



GETTY IMAGES/MICROSTOCKHUB/ISTOCK

La publicación del borrador del genoma humano en 2001 por dos grupos independientes, el Consorcio Internacional para la Secuenciación del Genoma Humano (CISGH) y el equipo de J. Craig Venter, supuso un hito histórico. Por primera vez, se abría la posibilidad de estudiar tramos largos de cada uno de los cromosomas humanos, base por base. Gracias a ello, los investigadores podían empezar a entender cómo estaban ordenados los distintos genes, y cómo se organizaba y estructuraba el ADN circundante que no codificaba proteínas. A pesar de este increíble progreso, el borrador del genoma aún estaba incompleto: faltaban más de 150 millones de bases por identificar. Los avances técnicos logrados desde entonces han permitido mejorar el borrador, y en 2020 se logró finalmente la secuenciación completa de un cromosoma. Como resultado, están empezando a emerger a la superficie nuevas partes del genoma hasta entonces no descritas, lo que está dando paso a otro emocionante período de descubrimientos biológicos.

¿Qué incluían exactamente los borradores iniciales del genoma? Contenían numerosas regiones intergénicas previamente inexploradas. También incluían la inmensa mayoría de los genes. El CISGH estimó al principio que el genoma comprendía entre 30.000 y 40.000 genes codificadores de proteínas, aunque la publicación de un genoma actualizado en 2004, junto con la mejora de las estrategias de predicción de genes, provocó que la cifra se revisara a cerca de 20.000. El genoma de 2004 aportó un mapa de alta resolución de 2850 millones de nucleótidos de la eucromatina. Esta corresponde a las regiones del ADN empaquetadas de una forma más holgada, que están enriquecidas en genes y representan aproximadamente el 92 por ciento del genoma humano.

El genoma de referencia impulsó a la comunidad científica hacia una era de exploración genómica, que redirigió el foco desde los genes individuales hasta estudios más genéricos del genoma completo. Sin embargo, seguía habiendo lagunas en cada uno de los 23 pares de cromosomas humanos, que, según las estimaciones, contienen más de 150 megabases de secuencias desconocidas. Las mayores lagunas se situaban en regiones enriquecidas con ADN altamente repetitivo o con secuencias para las que existen muchas copias casi idénticas. Al principio, estas secciones fueron difíciles de clonar, secuenciar y ensamblar correctamente. Como resultado, el proyecto del genoma humano infrarrepresentó a propósito tales secuencias repetitivas. Aunque los investigadores tenían una idea

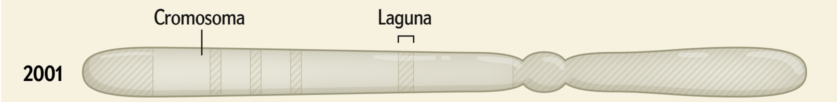
muy básica sobre su naturaleza, la organización genómica de alta resolución de la región en cuestión seguía sin concretarse.

En los primeros intentos por identificar las lagunas se empleó la secuenciación de lectura larga para abarcar las secuencias repetitivas, aunque tales lecturas al principio tendían a dar errores. En 2010 aparecieron nuevas oportunidades, gracias a los avances en la capacidad de leer fragmentos más largos de secuencia, junto con el desarrollo de herramientas bioinformáticas escalables. Las lecturas de secuencia de decenas a centenares de kilobases permitieron el estudio de la organización genómica de muchas lagunas de tamaño moderado. Esto permitió conocer algunas de las regiones subteloméricas (ADN muy repetitivo adyacente a las estructuras teloméricas, en los extremos de los cromosomas). También permitió el estudio de la primera secuencia satélite centromérica, en la que se repiten secuencias cortas en tándem durante unas 300 kilobases. De igual forma, se resolvió un subconjunto de duplicaciones segmentadas (secuencias que comparten entre el 90 y 100 por ciento de sus bases y ocupan múltiples localizaciones), muchas de las cuales contenían genes previamente ausentes del genoma de referencia. Sin embargo, muchas de las regiones más grandes ricas en repeticiones, de múltiples megabases de tamaño, seguían siendo inabarcables.

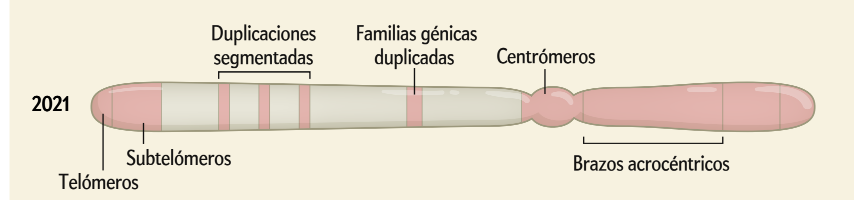
A lo largo de los últimos años, los datos de lecturas largas muy precisas y de lecturas ultra-largas han resultado esenciales para resolver estas regiones. Han revelado, por vez primera, tramos extremadamente largos de repeticiones en tándem y regiones enriquecidas en duplicaciones segmentadas. Al superar estas barreras técnicas, los científicos están descubriendo ahora extensas regiones ricas en repeticiones que pueden abarcar millones de bases, y constituir así el brazo corto entero de los cromosomas.

## DEL 2001 AL 2021: UN GENOMA MÁS DETALLADO

EL BORRADOR DEL GENOMA HUMANO del 2001 abarcó la mayor parte del ADN rico en genes, que se halla enrollado de forma holgada en el núcleo, pero dejó por resolver muchas lagunas en regiones muy compactadas. Gracias a los avances en secuenciación y bioinformática, hoy es posible estudiar dichas regiones, como se ilustra de forma esquemática en los dos cromosomas representados abajo (se ha exagerado la extensión de las regiones para facilitar la interpretación).




En el borrador de 2001, se dejaron de analizar muchas lagunas en regiones muy compactadas y ricas en secuencias repetitivas, que no suelen transcribirse (*gris oscuro*).




En 2021 es posible estudiar dichas lagunas, que incluyen las regiones teloméricas y subteloméricas en los extremos de los cromosomas; las estructuras centroméricas, esenciales para la división celular; y los brazos acrocéntricos, muy cortos y repetitivos. También pueden analizarse las regiones en las que el ADN está duplicado, ya sea en una única localización o de forma segmentada (*rosa*).

### Obtener la imagen completa

Sin embargo, los investigadores aún no entienden del todo las razones por las que algunas partes del genoma humano se organizan de la forma en que lo hacen. Alcanzar este conocimiento será, sin lugar a dudas, valioso, porque estas secuencias ricas en repeticiones suelen estar situadas en zonas que son cruciales para la vida. Por ejemplo, los tramos largos de repeticiones de ADN ribosómico (ADNr) codifican componentes de ARN de la maquinaria celular encargada de la síntesis de proteínas y desempeñan un papel importante en la organización nuclear. Y el ADN repetitivo de las estructuras denominadas centrómeros es esencial para una adecuada segregación cromosómica durante la división celular.

Estas largas tiras de ADN repetitivo vienen con distintos conjuntos de reglas, en términos de su organización y evolución genómicas. También están sujetas a diferente regulación epigenética (modificaciones moleculares en el ADN y en las proteínas asociadas a él que no alteran la secuencia básica del ADN), lo que lleva al ADN repetitivo a diferir de la eucromatina en lo que se refiere a organización, tiempo de replicación y actividad transcripcional. Muchas herramientas y conjuntos de datos del genoma completo todavía no pueden capturar toda esta información de las regiones de ADN extremadamente repetitivas. Por tanto, no se dispone aún de una imagen completa de los factores de transcripción que se unen a ellos, de cómo tales regiones se organizan espacialmente en el núcleo, o de cómo la regulación de estas partes de nuestro genoma cambia durante el desarrollo y en situaciones de enfermedad. En la actualidad, de forma muy parecida a lo que sucedió con la publicación inicial del genoma décadas atrás, los investigadores se enfrentan con un paisaje funcional nuevo e inexplorado del genoma humano. El acceso a esta información impulsará la tecnología y la innovación hacia la inclusión de dichas regiones de repeticiones, ampliando una vez más nuestra comprensión de la biología del genoma.

El año pasado, se utilizaron secuenciaciones de lecturas muy largas y precisas para reconstruir cromosomas humanos enteros de telómero a telómero. También tuvo lugar la publicación de un genoma de referencia humano casi completo a partir de una línea celular humana «haploide», en la que solo existen cinco lagunas que marcan las zonas de ADNr. En dicha línea, las células tienen dos pares idénticos de cromosomas, lo que simplifica el ensamblaje en comparación con las células humanas típicas (que son diploides, con diferentes cromosomas heredados de la madre y del padre). En conjunto, estos mapas permiten vislumbrar por vez primera, en alta resolución, las regiones centroméricas, las duplicaciones segmentadas, las repeticiones subteloméricas y cada uno de los cinco cromosomas acrocéntricos, que tienen unos brazos muy cortos formados casi

exclusivamente por ADN altamente repetitivo en un extremo.

Resulta tentador pensar que los científicos se acercan por fin a la línea de meta. Sin embargo, un único ensamblaje genómico, aunque esté completo con una precisión de secuencia casi perfecta, es una referencia insuficiente a partir de la que poder estudiar la variación en toda la población humana. Los mapas existentes que representan la diversidad a través de las partes eucromáticas del genoma deben extenderse para capturar por completo las regiones repetitivas, en las que el número de copias y la organización de las repeticiones varían entre individuos. Hacerlo requerirá el desarrollo de estrategias para la producción y el análisis rutinarios de genomas humanos diploides completos. El ambicioso objetivo de alcanzar una referencia más completa e integral de la humanidad mejorará, sin duda, nuestra comprensión de la estructura genómica y su papel en las enfermedades humanas, y se alineará con la promesa y el legado del Proyecto del Genoma Humano.

***Karen H. Miga***
*es investigadora del Instituto de Genómica de la Universidad de California en Santa Cruz.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 590, pág. 217, 2021.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Initial sequencing and analysis of the human genome. International Human Genome Sequencing Consortium en *Nature* n.º 409, págs. 860-921, 15 de febrero de 2001.
The sequence of the human genome. J. Craig Venter et al. en *Science*, vol. 291, págs. 1304-1351, febrero de 2001.
Finishing the euchromatic sequence of the human genome. International Human Genome Sequencing Consortium en *Nature* vol. 431, págs. 931-945, octubre de 2004.
Telomere-to-telomere assembly of a complete human X chromosome. Karen H. Miga et al. en *Nature* vol. 585, págs. 79-84, julio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

La función reguladora del genoma. Rafael R. Daga, Silvia Salas-Pino y Paola Gallardo en *IyC*, diciembre de 2013.
¿Cuántos genes tiene nuestro genoma? Cassandra Willyard en *IyC*, enero de 2019.

ALTAS ENERGÍAS

# El LHC sigue viendo indicios de nueva física

## En contra de lo que predice el modelo estándar, los muones y los electrones podrían no experimentar de la misma manera las interacciones fundamentales

*DANIEL GARISTO*

Si la belleza está en los ojos de quien la contempla, consideremos un nuevo y prometedor resultado que ha cautivado a los físicos de partículas de todo el mundo. En concreto, los científicos están interesados en los nuevos datos del detector LHCb (cuya *b* significa *beauty*, «belleza») del Gran Colisionador de Hadrones (LHC). Este experimento estudia desintegraciones de mesones *B*, partículas que contienen quarks *belleza* (*b*, también conocidos como *fondo*, o *bottom*).

A finales de marzo, durante una de las sesiones virtuales de la conferencia anual Rencontres de Moriond, unos mil físicos vieron cómo la colaboración del LHCb anunciaba indicios de una discrepancia inexplicada entre el comportamiento de los electrones y el de sus parientes más masivos, los muones.

Según el modelo estándar, la teoría que describe las partículas elementales y las interacciones que experimentan salvo la gravedad, los electrones y los muones (dos tipos, o «sabores», de leptones) son idénticos excepto por su masa. Por lo tanto, los mesones *B* deberían desintegrarse en un kaón y dos muones (siendo más precisos, en una pareja muon-antimuón) con la misma probabilidad que en un kaón y dos electrones. Sin embargo, el LHCb ha observado una diferencia en esta rara desintegración del quark *b*: los mesones *B* parecen desintegrarse en muones con una frecuencia un 15 por ciento menor.

«Sin duda, esta nueva medición es intrigante», asegura Monika Blanke, física teórica del Instituto de Tecnología de Karlsruhe que no participó en la investigación. «Si acabamos obteniendo una confirmación experimental, significará que realmente hay algo más allá del modelo estándar que trata los sabores de los leptones de forma distinta.»

### Una discrepancia recurrente

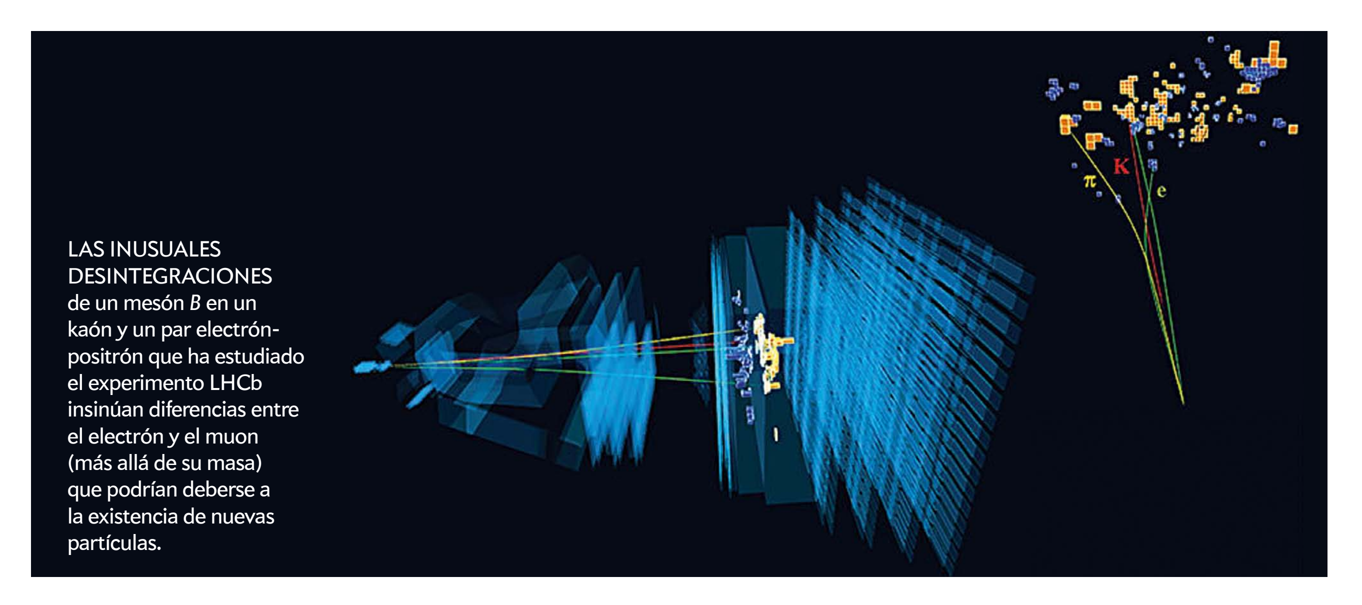
Los físicos se han preguntado durante largo tiempo si muones, electrones y tauones (otro tipo de leptones) poseen diferencias aparte de su masa, y el último resultado del LHCb sugiere que la respuesta podría ser afirmativa. El hallazgo tiene una significación estadística de 3,1 sigmas, por lo que supera el valor mínimo que se exige en física de partículas para poder hablar de «indicio».

En términos más precisos, una significación de 3,1 sigmas implica que, si no existiera nueva física, las fluctuaciones estadísticas llevarían a los investigadores a medir una discrepancia de al menos el 15 por ciento entre electrones y muones aproximadamente una de cada 1000 veces que realizaran el experimento.

Aunque eso parecería sugerir que la diferencia observada es con gran seguridad algo más que un espejismo, el efecto aún está muy lejos del patrón oro de los descubrimientos en física de partículas. Este requiere 5 sigmas, lo que indica que habría que realizar el experimento más de 3,4 millones de veces para observar una casualidad estadística semejante.

¿Por qué tanto alboroto con las estadísticas? A lo largo de los años, el LHCb y otros experimentos han registrado varias discrepancias entre electrones y muones con una significación de 2 y 3 sigmas. Pero, después, esos resultados no perduraron: cuando se obtuvieron más datos, las diferencias entre leptones desaparecieron.

«Si se tratara de una única observación, no estaría muy emocionado. Ya he visto desvanecerse otras anomalías», señala Gino Isidori, físico teórico de la Universidad de Zúrich que no participó en la investigación. Pero el último resultado del




LAS INUSUALES DESINTEGRACIONES de un mesón *B* en un kaón y un par electrón-positrón que ha estudiado el experimento LHCb insinúan diferencias entre el electrón y el muon (más allá de su masa) que podrían deberse a la existencia de nuevas partículas.



LHCb le parece alentador porque se suma a otras mediciones que también insinúan diferencias entre electrones y muones. Para Isidori y otros físicos de partículas, es motivo suficiente para albergar un cauto entusiasmo.

## Una manera distinta de buscar partículas

Situado en la frontera entre Francia y Suiza, el LHCb es uno de los múltiples detectores situados lo largo del anillo de 27 kilómetros del Gran Colisionador de Hadrones. Aunque el LHCb también examina los resultados de las colisiones protón-protón, se centra en desintegraciones muy poco frecuentes, como las de los mesones *B*.

«Las desintegraciones raras constituyen una manera distinta de buscar partículas pesadas», explica Patrick Koppenburg, físico de partículas del LHCb. En vez de estrellar unos protones contra otros y tratar de hallar señales de nuevas partículas entre los productos de la colisión, como hizo el LHC en su colosal y exitosa búsqueda del bosón de Higgs, el LHCb estudia pequeñas variaciones en eventos muy inusuales.

Así, la desintegración de un mesón *B* no genera partículas desconocidas. Pero la frecuencia con que se produce puede depender de partículas pesadas aún por descubrir y que, entre bastidores, afecten al resultado final del experimento. En los años sesenta, por ejemplo, las desintegraciones raras de los kaones insinuaron la existencia del quark *encanto* antes de que se descubriera de forma directa. El LHCb está diseñado para encontrar este tipo de agujas en el pajar. Aun así, el trabajo es difícil y está lleno de incertidumbres experimentales.

También hay que tener en cuenta las incertidumbres teóricas, que afectan a las predicciones del modelo estándar con las que los investigadores comparan sus resultados. Parte de la emoción en torno al último anuncio del LHCb se debe a que esa desintegración concreta del mesón *B* es muy «limpia»; es decir, tiene una incertidumbre teórica muy pequeña. Eliminar una fuente de error de ese tipo hace que resulte mucho más fácil dilucidar si la diferencia entre los electrones y los muones es real o no.

Desde que se formuló el modelo estándar en los años setenta, los físicos teóricos han propuesto modelos que buscan explicar tales diferencias a partir de nuevas partículas. Dos de las principales candidatas son el llamado bosón *Z′* (pronunciado «zeta prima»), una variación del bosón *Z* habitual, y el leptoquark, una partícula que conectaría los leptones y los quarks. A partir de ahora, los teóricos usarán los últimos resultados para actualizar sus modelos. De hecho, menos de 24 horas después del anuncio del LHCb ya habían aparecido tres nuevos artículos en el repositorio de prepublicaciones arXiv.

Pero la física de esta desintegración rara dista mucho de estar bien establecida, y se necesitarán muchos más datos para poder afirmar que la responsable de la discrepancia es una nueva partícula. La mejor opción para verificarlo la proporcionará Belle II, un experimento japonés. Mikihiko Nakao, investigador que participa en Belle II, prevé que tardará unos cinco años en alcanzar la sensibilidad del LHCb.

Ahora mismo el LHCb se encuentra parado mientras se realizan labores de mantenimiento. Pero, cuando vuelva a ponerse en marcha el año que viene, con un detector mejorado, podría reunir la misma cantidad de datos que se han obtenido en la última década en tan solo un año, explica Koppenburg.

Los físicos son conscientes de que es muy posible que este último resultado, una anomalía en los datos, no sea más que una fluctuación estadística sin mayor trascendencia. Tras varias decepciones, ahora se cubren las espaldas e intentan abstenerse de transmitir certidumbre o una emoción exagerada. Pero, si es real, sería un resultado muy bello.

***Daniel Garisto** es físico y periodista científico especializado en física de partículas.*

**PARA SABER MÁS**

**Test of lepton universality using $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$ decays.** Colaboración LHCb en *Physical Review Letters*, vol. 113, art. 151601, octubre de 2014.
**Measurement of *CP*-averaged observables in the $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ decay.** Colaboración LHCb en *Physical Review Letters*, vol. 125, art. 011802, julio de 2020.
**Test of lepton universality in beauty-quark decays.** Colaboración LHCb en arXiv:2103.11769, marzo de 2021.

**EN NUESTRO ARCHIVO**

**¿Indicios de nueva física en el LHC?** Joaquim Matias en *IyC*, agosto de 2017.
**Medir la belleza.** Guy Wilkinson en *IyC*, enero de 2018.
**Los resultados anómalos se acumulan en el LHC.** Charlie Wood en *IyC*, julio de 2020.



BIOLOGÍA EVOLUTIVA

# La evolución de la metamorfosis en los insectos



Los mecanismos que explican el origen y la evolución de la metamorfosis han constituido desde hace tiempo un enigma. La escala molecular de observación, sin embargo, está aportando nueva luz

*Xavier Bellés*

**Xavier Bellés,** experto en entomología, es profesor de investigación en el Instituto de Biología Evolutiva (CSIC-Universidad Pompeu Fabra), en Barcelona. Autor de varios libros, acaba de publicar *Insect metamorphosis. From natural history to regulation of development and evolution* (Academic Press, London, 2020).



El éxito evolutivo de los insectos ha sido extraordinario. Con algo más de un millón de especies descritas, y entre 10 y 30 millones todavía por descubrir, estos pequeños artrópodos de seis patas han conquistado prácticamente todos los hábitats de nuestro planeta, desde los más áridos desiertos hasta las regiones cercanas a los polos. Al surgir pronto en la historia de la vida, los insectos tuvieron mucho tiempo para evolucionar y adquirir una serie de adaptaciones clave que actuaron como motores de expansión y diversificación. Gran parte de ese éxito se debió a la invención de la metamorfosis, hace unos 400 millones de años. Las ventajas que esta aportó resultan indiscutibles, como lo muestra el hecho de que el 99,9 por ciento de las especies de insectos que conocemos hoy se desarrollan por esta vía.

A pesar de la importancia de la metamorfosis, el modo en que se originó y evolucionó sigue siendo un misterio, aunque no falten teorías que pretendan explicarlo. Las principales controversias giran en torno a los procesos moleculares, celulares y morfológicos que habrían dado pie a esta innovación tan singular.

Diversos aspectos de esos procesos han sido desvelados por nuestro grupo de investigación, basándonos, en gran parte, en los resultados de nuestros trabajos y experimentos con la cucaracha rubia (*Blatella germanica*). Con ellos pretendemos responder a las preguntas relacionadas con los mecanismos hormonales y moleculares subyacentes al origen de la metamorfosis y a su evolución a lo largo de la historia de los insectos.

El marco conceptual y metodológico que utilizamos es el propio de la biología evolutiva del desarrollo, conocida coloquialmente como evo-devo. Esta disciplina trata de identificar, a menudo a través de estudios comparados de diferentes especies, los cambios en el desarrollo embrionario y postembrionario que dieron lugar a las innovaciones evolutivas. Al adoptar la perspectiva de la evo-devo es posible abordar varias cuestiones clave: ¿de qué manera el control hormonal del desarrollo en los insectos ancestrales habría impulsado la evolución de la metamorfosis? ¿Cómo y cuándo los genes del desarrollo activaron las redes moleculares que determinaron las distintas formas orgánicas y tisulares? ¿Cómo se habrían propagado esos cambios en las poblaciones de insectos?

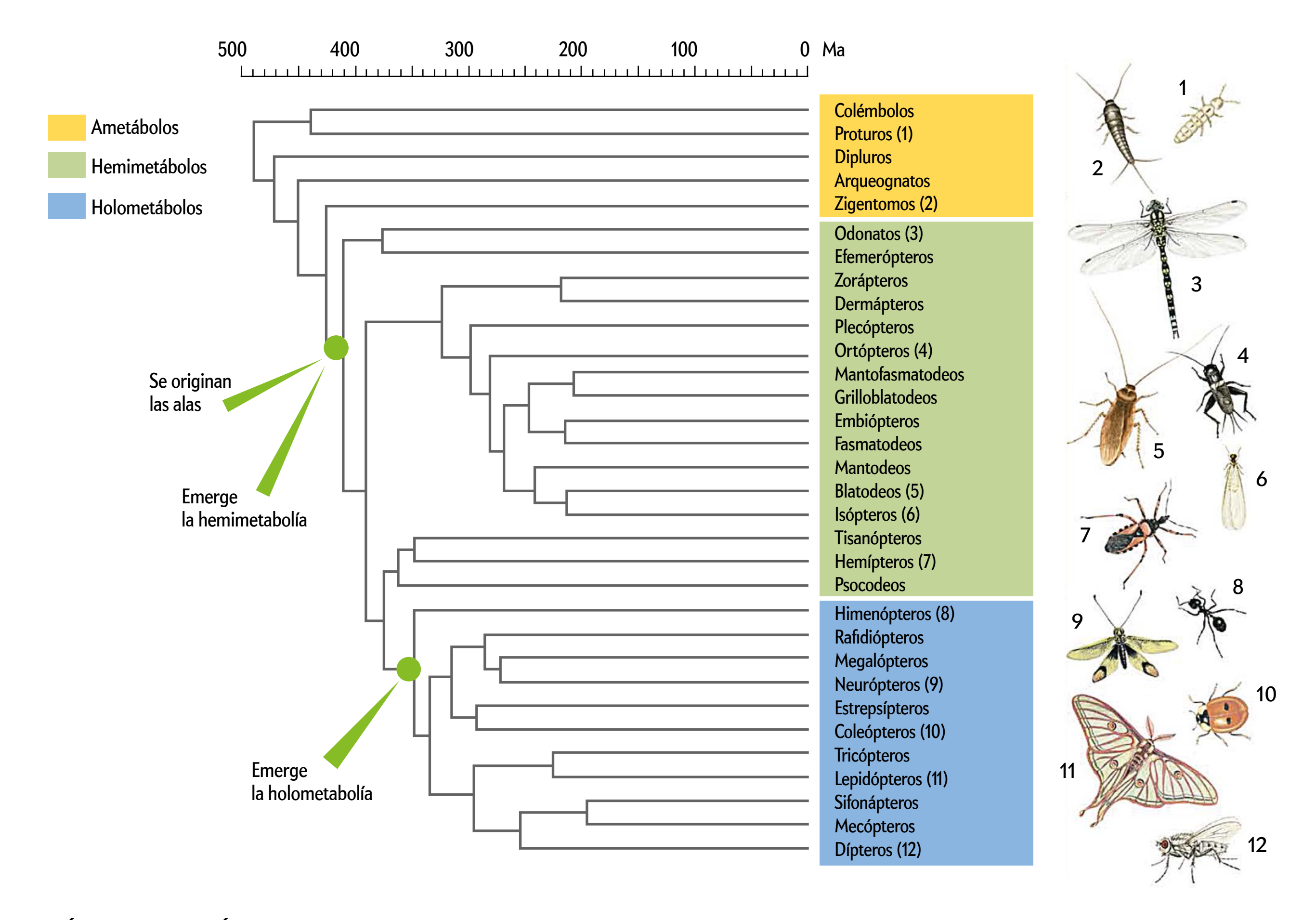
## EN SÍNTESIS

**Desde hace siglos,** los científicos se preguntan cómo se originó y evolucionó la metamorfosis de los insectos y cómo se produjo la transición de la metamorfosis incompleta a la completa.

**Para responder a esas preguntas** se han propuesto dos teorías contrapuestas. La primera postula que en la metamorfosis completa se adelantó la eclosión del embrión, lo que dio lugar a dos nuevas fases inmaduras: la larva y la pupa. La segunda rechaza ese adelanto y propone una modificación en el desarrollo embrionario, con el mismo resultado.

**El respaldo** que han recibido una y otra teoría ha ido cambiando a lo largo del tiempo. Sin embargo, los datos más recientes sobre los mecanismos genéticos que regulan la metamorfosis sugieren que la segunda teoría se ajusta mejor a los hechos.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/CATHYKEIFER/ISTOCK
EN ESTA PÁGINA: INVESTIGACIÓN Y CIENCIA A PARTIR DE UNA FOTOGRAFÍA DE ROGER BELLÉS (*Xavier Bellés*)




**EL ÁRBOL FILOGENÉTICO DE LOS INSECTOS** representa las relaciones evolutivas y de parentesco entre los diferentes grupos de especies. Los insectos ametábolos (sin metamorfosis) son los más primitivos y no alcanzan el millar de especies. La aparición de la metamorfosis impulsó la diversificación de los insectos, con más de un millón de especies. Primero surgió la metamerfosis incompleta (hemimetabolía), casi a la vez que las alas, hace unos 400 millones de años (Ma); y unos 50 millones de años después, la completa (holometabolía).

ADAPTADO A PARTIR DE «MICRORNAS AND THE EVOLUTION OF INSECT METAMORPHOSIS», DE XAVIER BELLÉS EN *ANNUAL REVIEW OF ENTOMOLOGY*, VOL. 62, PÁGS. 111-125, ENERO DE 2017; JORDI CORBERA (*insectos*)

En el presente artículo analizaremos los mecanismos de desarrollo y evolución propuestos recientemente por nuestro grupo y otros, los cuales permiten juzgar mejor la verosimilitud de las teorías que hoy se debaten sobre el origen y la evolución de la metamorfosis.

## FORMAS DE CONVERTIRSE EN ADULTO

Conviene recordar, ante todo, que los insectos, al poseer un exoesqueleto rígido, precisan mudar varias veces durante el desarrollo para poder aumentar de tamaño. El exoesqueleto, compuesto mayormente de cutícula, ofrece numerosas ventajas, ya que soporta la fijación de los músculos para la locomoción y el vuelo, evita daños físicos y químicos y protege contra la pérdida de agua y las enfermedades infecciosas. Sin embargo, su rigidez plantea un problema para el crecimiento. Los insectos lo han resuelto mediante la muda: cuando la cutícula se queda pequeña, es sustituida por una nueva más espaciosa. Además, la muda no es solo un mecanismo que resuelve el problema del crecimiento, sino que también sirve para permitir cambios de forma.

Pero no todos los insectos presentan metamorfosis. Los más primitivos, que carecen de alas, crecen progresivamente, mediante mudas sucesivas pero sin experimentar cambios morfológicos notables. Así, el primer estadio de desarrollo, denominado ninfa, se asemeja mucho al adulto con capacidad reproductiva. Además, el adulto sigue mudando periódicamente. Este grupo de insectos, que denominamos ametábolos, están representados hoy en día por los pececillos de cobre (arqueognatos) y de plata (zigentomos), y suman poco más de 700 especies.

De los ametábolos derivan los insectos que presentan una metamorfosis incompleta, o hemimetábolos. En ellos, igual que en los ametábolos, el embrión se desarrolla y forma una ninfa que presenta una morfología muy similar a la del adulto. Esta también crece gradualmente a través de mudas sucesivas, pero, a diferencia de los ametábolos, muestra primordios alares (rudimentos de alas) externos. En la última muda se convierte en adulto y completa el desarrollo de las alas y también de las estructuras genitales. Una vez se ha trasformado en adulto, deja de mudar. Los hemimetábolos suman unas 170.000 especies descritas y agrupan insectos que nos resultan familiares, como los grillos y las langostas (ortópteros), las cucarachas y las termitas (blátidos), las cigarras, las moscas blancas y los chinches de campo (hemípteros), así como las libélulas (odonatos) y las efímeras (efemerópteros).

A su vez, los hemimetábolos dieron lugar a los insectos con metamorfosis completa, u holometábolos. En ellos, el embrión se desarrolla de modo peculiar y forma un individuo que denominamos larva, muy diferente morfológicamente del adulto. La larva va creciendo a través de mudas sucesivas, pero en ningún momento exterioriza primordios alares. Al final del período larvario se produce la muda hacia la pupa, una fase





DOS METAMORFOSIS: La cucaracha rubia (*Blattella germanica*) ofrece un ejemplo de metamorfosis incompleta, o hemimetábola. Aquí se aprecia la secuencia de la última muda de la ninfa, que se deshace del exoesqueleto antiguo y se convierte en adulto (*izquierda*). La mariposa de la seda (*Bombyx mori*) presenta metamorfosis completa, u holometábola. En la imagen, un macho adulto emerge de la pupa y se abre camino a través del capullo de seda (*derecha*).

CRISTINA OLIVELLA, INSTITUTO DE BIOLOGÍA EVOLUTIVA, CSIC-UNIVERSITAT POMPEU FABRA (*cucaracha*); ALBERT MASÓ/WILD IMAGES (*mariposa de la seda*)

morfológicamente intermedia entre la larva y el adulto en la que se realiza la muda hacia el adulto con alas y con capacidad reproductiva. Los holometábolos son el grupo más numeroso de los insectos, con unas 850.000 especies descritas. Entre ellas destacan, por su excepcional diversidad, las avispas, las abejas y las hormigas (himenópteros), los escarabajos (coleópteros), las mariposas y las polillas (lepidópteros), y las moscas y los mosquitos (dípteros).

### ADAPTACIONES MORFOLÓGICAS EXITOSAS

Pero ¿cuándo se desarrolló la metamorfosis? Los datos del registro fósil y los análisis filogenéticos (estudios comparativos que intentan establecer el parentesco entre las especies y su genealogía) nos informan sobre el momento y el modo en que aparecieron los dos tipos de metamorfosis descritos arriba.

La hemimetabolía surgió con el grupo de los insectos pterigotos (con alas) hace unos 400 millones de años, entre principios y mediados del Devónico. En ese mismo período se originaron las alas, y es muy posible que esa importante innovación condicionara la emergencia de la metamorfosis y de la última muda. Recordemos que los insectos ametábolos y ápteros (sin alas), como los pececillos de plata y de cobre, se desarrollan de forma gradual hasta convertirse en adultos, pero después siguen mudando y creciendo. En cambio, los hemimetábolos dejan de hacerlo al alcanzar la fase adulta. ¿Qué sentido adaptativo tuvo esa novedad de dejar de mudar? Es probable que ello guarde relación con la formación y el despliegue de las alas membranosas en el adulto. La muda de un ala puede ser mecánicamente compleja debido a la fragilidad de su estructura, y el proceso de volver a mudarla podría conferir al insecto una vulnerabilidad considerable.

En cuanto a la siguiente gran innovación evolutiva, la holometabolía, los datos indican que se produjo hace unos 350 millones de años, a principios del período Carbonífero. El ciclo biológico del insecto holometábolo se caracteriza porque las larvas no exteriorizan los caracteres adultos, en particular los primordios alares, pero tampoco exteriorizan los ojos compuestos ni las patas y antenas del adulto. Dichas estructuras se formarán en la fase intermedia de la pupa y lo harán a partir de agrupaciones de células precursoras, denominadas imaginales (el «imago» es el insecto adulto), que se mantienen bajo la epidermis durante el período larvario. En los insectos más especializados, como las moscas, estas agrupaciones de células están encapsuladas en estructuras rígidas llamadas discos imaginales. Así pues, la transición evolutiva de la hemimetabolía a la holometabolía requiere que se originen dos formas juveniles nuevas: por un lado, la larva, que no exterioriza las alas ni otras estructuras adultas, y por otro lado, la pupa, en la que se exteriorizan esas estructuras como paso previo a la formación del adulto.

Ya hemos comentado el éxito abrumador de la holometabolía: del millón de especies que se desarrollan mediante metamorfosis, unas 850.000 son holometábolas. Sin embargo, una cuestión que todavía se debate es cuál fue la principal ventaja selectiva que aportó ese cambio y contribuyó a la gran diversificación de las especies. Un punto de vista generalizado es que el éxito se debió a la ausencia de competencia entre juveniles y adultos de la misma especie, ya que ambos explotan recursos alimentarios diferentes. Aunque ello es cierto para la mayoría de las especies,

esa característica no lo explica todo. Posiblemente, la ventaja más importante de los holometábolos sea la capacidad de adaptación morfológica de la larva. Al tener protegidas las agrupaciones de células imaginales en el interior del cuerpo, la larva puede evolucionar hasta adquirir, por ejemplo, un cuerpo vermiforme capaz de minar y comer la pulpa de una fruta, recurso difícilmente accesible para un insecto articulado con primordios alares y otros apéndices externos que sobresalgan.

No parece una coincidencia que la mayor radiación de los insectos holometábolos avanzara en paralelo al extraordinario incremento en la diversidad de las floras terrestres a lo largo del Devónico. Esa diversificación culminó con la aparición de las plantas con semillas a inicios del Carbonífero, la cual conllevó una inmensa fuente de nuevos alimentos para los insectos. Es plausible, pues, que la principal presión selectiva que impulsó la emergencia de la larva y la holometabolía fuera la oportunidad que se presentó de explotar los nuevos recursos disponibles. Además, la larva holometábola, sin las restricciones de la estructura corporal adulta propias de la ninfa hemimetábola, habría logrado otras optimizaciones. Así, está bien demostrado que la diversificación de los grupos de insectos fitófagos estuvo acompañada por la especialización de las piezas bucales. La mejor accesibilidad a los recursos alimentarios, a su vez, habría dado lugar a un metabolismo más eficaz, a mayores tasas de crecimiento y al acortamiento del ciclo biológico. Asimismo, la holometabolía habría facilitado que surgieran mecanismos hormonales y moleculares más efectivos para regular el desarrollo.

### HORMONAS QUE REGULAN LA METAMORFOSIS

Para que se produzca la metamorfosis es necesario que se forme una nueva cutícula, se reorganicen los tejidos existentes o se creen otros nuevos. Ello es posible gracias a una secuencia de pasos complejos y perfectamente coordinados por la acción de las hormonas, que regulan todo el proceso.

Es significativo que tanto la metamorfosis hemimetábola como la holometábola estén gobernadas por dos hormonas: la hormona juvenil (químicamente, un terpenoide), y la ecdisona y su derivado biológicamente más activo, la 20-hidroxiecdisona (de naturaleza esteroidea). La hormona juvenil es segregada en unas glándulas situadas en la parte posterior del cerebro, denominadas *corpora allata*, y su función primordial es impedir que se produzca la metamorfosis. La ecdisona se sintetiza en las glándulas protorácicas, localizadas en el tórax, y es la responsable de promover las mudas, tanto las juveniles, que permiten el crecimiento, como las que determinan los cambios metamórficos, que dan lugar al adulto. Así, mientras los *corpora allata* produzcan hormona juvenil, las mudas inducidas por la ecdisona serán mudas juveniles; pero cuando deje de liberarse la hormona juvenil, la muda generará el individuo adulto. Al impedir la metamorfosis, la hormona juvenil favorece el crecimiento de las larvas o las ninfas hasta que alcanzan el tamaño adecuado para transformarse en adultos plenamente funcionales, sobre todo desde el punto de vista reproductor.

### DOS TEORÍAS EN LIZA

La gran influencia que ejerció la metamorfosis en el éxito evolutivo de los insectos ha llevado a numerosos autores a preguntarse sobre su origen y su evolución, y a plantear diversas teorías al respecto. Estas ideas han ido evolucionando a lo largo del tiempo, a medida que se ha ido ahondando en los procesos implicados, desde los morfológicos y los fisiológicos hasta los genéticos y los moleculares.

Si bien los intentos por interpretar la metamorfosis de los insectos datan de tiempos inmemoriales, la primera teoría verdaderamente científica sobre ella se atribuye a John Lubbock. Contemporáneo y amigo de Darwin, respaldó las ideas de este sobre la evolución por selección natural y buscó una explicación científica sobre el origen evolutivo de la metamorfosis, en especial la completa, u holometabolía. Así, en 1873 propuso que el embrión de las especies holometábolas eclosiona (emerge del huevo) en una fase de desarrollo anterior al que lo hacen las hemimetábolas; es decir, ambos grupos de insectos abandonan la fase de huevo en diferentes momentos del desarrollo embrionario. La teoría de Lubbock, formalizada por el entomólogo italiano Antonio Berlese en 1913, llegaría a gozar de una amplia aceptación hasta la década de 1960.

**En los insectos holometábolos, la distinta alimentación de los juveniles y los adultos impulsó la diversificación de las especies**

En esa época, Howard E. Hinton, de la Universidad de Bristol, basándose en datos morfológicos, sugirió otra idea, que se conoce hoy como teoría de la homología directa. Según ella, las etapas juveniles de los insectos hemimetábolos serían equivalentes, u homólogas, a las de los holometábolos, lo que significa que tendrían el mismo origen evolutivo. El planteamiento de la homología directa entre estadios arranca de los conceptos formalizados por el entomólogo Éraste Poyarkoff en 1914, en oposición a las teorías de Berlese. Para Poyarkoff, la pupa se originó como una suerte de molde necesario para el desarrollo de determinados músculos esqueléticos adultos. Además, propuso dos ideas importantes: la primera, que la pupa era homóloga al adulto hemimetábolo, por lo que habría surgido al subdividirse la fase adulta en dos subfases; la segunda sostenía que el desarrollo embrionario de las especies hemimetábolas equivalía al de las holometábolas. Hinton inicialmente aceptó las dos ideas de Poyarkoff. Sin embargo, después de estudiar la metamorfosis de los músculos de las alas en varios insectos, descartó que la pupa fuera una subfase de la fase adulta. En cambio, llegó a la conclusión de que todas las etapas juveniles holometábolas eran homólogas a las de los hemimetábolos, incluida la pupa, que sería homóloga al último estadio ninfal.

En 1996, Jan Zrzavý, del Instituto de Entomología de la Academia de Ciencias de la República Checa, y sus colaboradores añadieron argumentos filogenéticos, morfológicos y fisiológicos a la teoría de la homología directa entre estadios. En particular, argumentaron que la holometabolía evolucionó mediante la especialización de la larva y su divergencia morfológica respecto al adulto. Así, los cambios morfológicos que se requieren para tener una estructura corporal similar a la del adulto explicarían la innovación de la fase pupal; esta es morfológicamente intermedia entre la larva y el adulto y equivaldría al último estadio ninfal de los hemimetábolos. Recordemos que para que

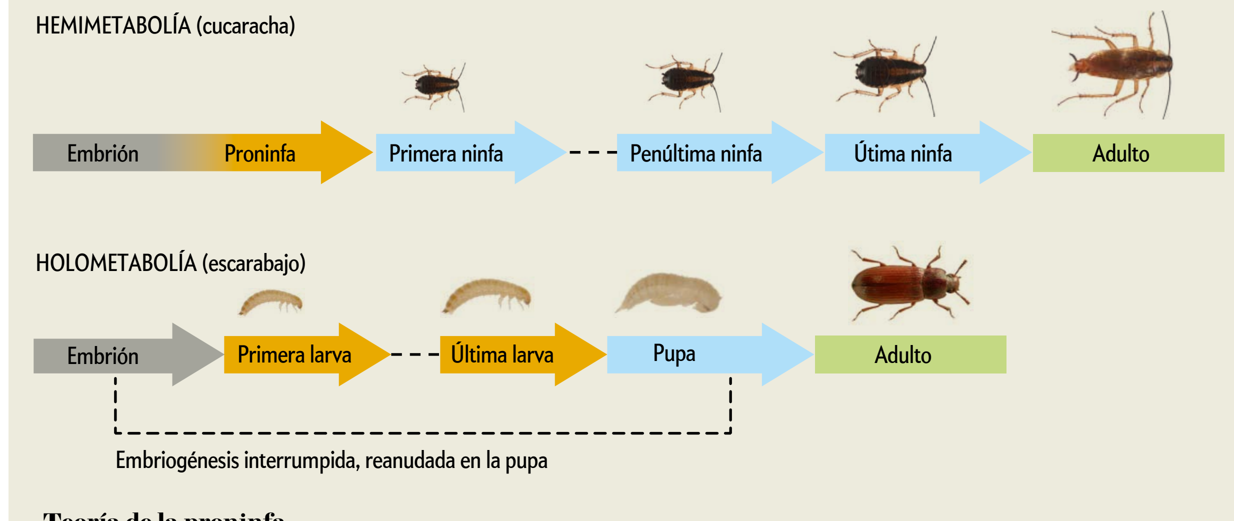
se desencadene la metamorfosis debe desaparecer la hormona juvenil. Y como ello sucede en el último estadio ninfal de los hemimetábolos y en la pupa de los holometábolos, Zrzavý y sus colaboradores sugieren que ello es una prueba más de la homología de esas dos fases del desarrollo.

La teoría de la homología directa entre estadios prevaleció hasta 1999, cuando James Truman y Lynn Riddiford, de la Universidad de Washington, en Seattle, resucitaron los conceptos de Lubbock y Berlese y los modernizaron en lo que hoy se conoce como teoría de la proninfa.

TEORÍAS

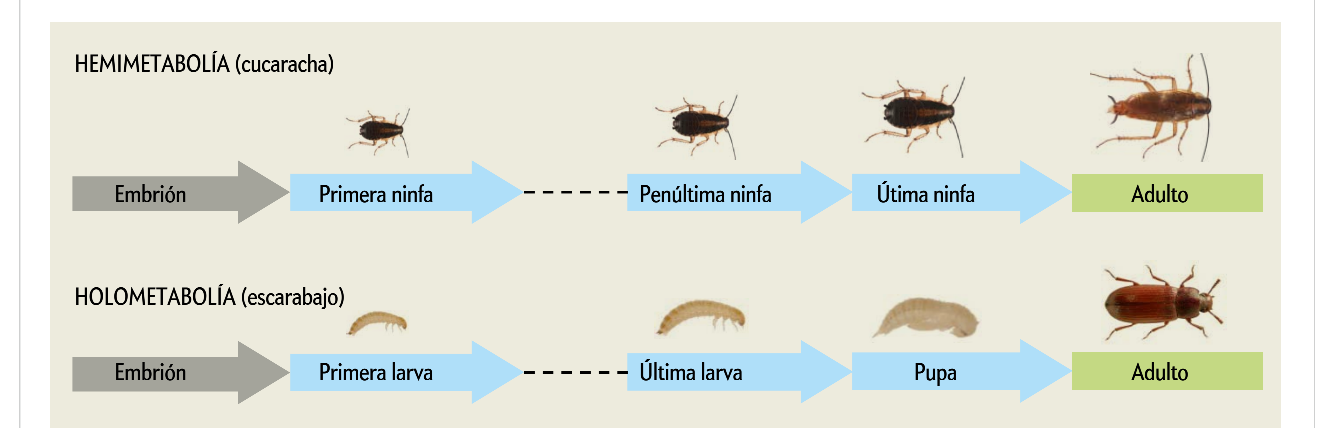
## De la metamorfosis incompleta a la completa

**Con el propósito de entender** cómo evolucionó la metamorfosis, en especial el paso de la metamorfosis incompleta (hemimetabolía) a la completa (holometabolía), se han desarrollado dos teorías principales: la de la proninfa y la de la homología directa. Ambas intentan establecer homologías entre las sucesivas fases de desarrollo en los dos tipos de metamorfosis. Abajo se resumen las dos teorías a partir de la representación de las fases de un insecto hemimetábolo (la cucaracha rubia, *Blattella germanica*) y de otro holometábolo (el escarabajo rojo de la harina, *Tribolium castaneum*).




**Teoría de la proninfa**

Sostiene que el embrión hemimetábolo presentaría una fase final denominada proninfa, que equivaldría al conjunto de las fases larvarias de los holometábolos (*naranja*). La larva se habría formado debido a una interrupción del desarrollo embrionario, que se reanudaría en la pupa. Y esta sería homóloga al conjunto de los estadios ninfales de los hemimetábolos (*azul*)




**Teoría de la homología directa**

Argumenta que en el desarrollo embrionario de los holometábolos se produciría una divergencia respecto al de los hemimetábolos, la cual daría lugar a una larva en lugar de una ninfa. Propone una homología directa entre las sucesivas fases de ninfa y de larva, siendo la pupa homóloga al último estadio ninfal (*azul*).

GRUPO DE EVOLUCIÓN DE LA METAMORFOSIS DE LOS INSECTOS. INSTITUTO DE BIOLOGÍA EVOLUTIVA (UPF-CSIC)

En dicha teoría, Truman y Riddiford argumentaron que, en los insectos hemimetábolos, cuando el embrión se desarrolla dentro del huevo, deposita en la parte externa del cuerpo tres cutículas sucesivas (se trata de cutículas embrionarias, equivalentes a las que configuran el exoesqueleto de las fases postembrionarias). Pero, después de depositarse la segunda cutícula, se formaría una fase embrionaria denominada proninfa. Esta produciría la tercera cutícula y, tras eclosionar, daría lugar al primer estadio ninfal. En cambio, en los insectos holometábolos, el embrión no depositaría la tercera cutícula, por lo que, en lugar de producir la ninfa, eclosionaría prematuramente en forma de larva. Más adelante, en la fase de pupa, la larva reanudaría el desarrollo que se había detenido en el embrión, y se formarían entonces las estructuras adultas, como las alas y los órganos sexuales. Esos razonamientos condujeron a Truman y Riddiford a proponer que la proninfa hemimetábola sería homóloga al conjunto de los estadios larvarios de los holometábolos, mientras que el conjunto de los estadios ninfales de los hemimetábolos sería homólogo a la pupa (*veáse el recuadro* «De la metamorfosis incompleta a la completa»).

Pero en 2005, las observaciones embriológicas del grupo de Zrzavý demostraron que, en realidad, los embriones de todas las especies de insectos con alas, con independencia de su tipo de metamorfosis, depositan tres cutículas (excepto las especializadas moscas, en las cuales se ha perdido la formación de la tercera). Ello llevó a Truman y Riddiford a revisar su teoría y adaptarla a esa evidencia. En un artículo publicado en 2019, en lugar de centrarse en las cutículas, ponían el énfasis en la idea de la interrupción del desarrollo en el embrión holometábolo y su reanudación en la etapa pupal. En ese marco, siguieron manteniendo la idea de la homología de la proninfa con las larvas holometábolas, y de las ninfas con la pupa.

A la luz de esas dos teorías, ¿cómo influirían las hormonas en los cambios del desarrollo? La teoría de la proninfa propone que un cambio en la secreción de la hormona juvenil durante la embriogénesis habría sido fundamental en la evolución de la holometabolía. Truman y Riddiford argumentan que, en las especies hemimetábolas, las dos primeras cutículas embrionarias se depositan en ausencia de la hormona juvenil, mientras que la tercera lo hace en su presencia. Por el contrario, los embriones holometábolos comenzarían a segregar la hormona juvenil desde que se deposita la primera cutícula. Así, sugieren que el adelanto en la secreción de esa hormona durante el desarrollo embrionario habría provocado el cambio morfológico de la proninfa a la larva.

Sin embargo, estudios posteriores han demostrado que el perfil del contenido de la hormona juvenil a lo largo de la embriogénesis es muy variado tanto en hemimetábolos como en holometábolos, y que no hay una distinción tajante entre ambos grupos en lo que se refiere al inicio de la producción hormonal. Por lo demás, los experimentos en los que se ha administrado hormona juvenil a embriones hemimetábolos antes de que depositen la tercera cutícula tampoco demuestran de forma fehaciente que esa presencia temprana de la hormona provoque el desarrollo de estructuras larvarias en lugar de ninfales.

La aceptación de una u otra teoría a lo largo de la historia reciente ha seguido una especie de movimiento pendular. La de Lubbock-Berlese fue desplazada por la de la homología directa entre estadios de Hinton, que, a su vez, lo fue por la de la proninfa de Truman y Riddiford. Esta última es la más aceptada hoy en día, posiblemente por su elegancia conceptual. Sin embargo, el análisis de los mecanismos reguladores de la metamorfosis a escala molecular parece que mueve el péndulo de nuevo hacia la teoría de la homología directa entre estadios.

### LOS MECANISMOS MOLECULARES APORTAN NUEVA LUZ

Detrás de la acción de las hormonas hay mecanismos moleculares que traducen la señal hormonal y la convierten en cambios celulares, tisulares y morfológicos. Por lo general, estos mecanismos comienzan con la interacción de la hormona con su receptor celular. Al unirse a él, se inicia una cascada de reacciones moleculares que darán lugar al desarrollo de los tejidos y los órganos.

Tanto la hormona juvenil como la ecdisona ejercen su acción a través de estas cascadas. La de la ecdisona empieza con la unión de esta al receptor de la ecdisona (EcR, por sus siglas en inglés), al que, a su vez, se le une el correceptor ultraespiráculo (USP). A continuación, el complejo formado por ecdisona, EcR y USP activa otros genes, que van transmitiendo la señal hormonal en cascada hasta activar el programa genético correspondiente en los tejidos adecuados. Dos genes de la cascada, *Br-C* y *E93*, destacan por su papel singular en la metamorfosis. El primero da lugar a la proteína Broad complex (Br-C), que promueve el desarrollo de los primordios alares durante las etapas ninfales de los insectos hemimetábolos, mientras que en los holometábolos, determina la formación de la pupa. El segundo, que codifica la proteína E93, fue descubierto en la mosca *Drosophila melanogaster* y está relacionado con la muerte celular programada, durante la metamorfosis, de ciertas estructuras larvarias. Además, de modo importante, determina la formación del adulto, tanto en los insectos hemimetábolos como en los holometábolos.

**El cambio de sensibilidad a la hormona juvenil propiciaría la evolución de una ninfa hemimetábola a una larva holometábola**

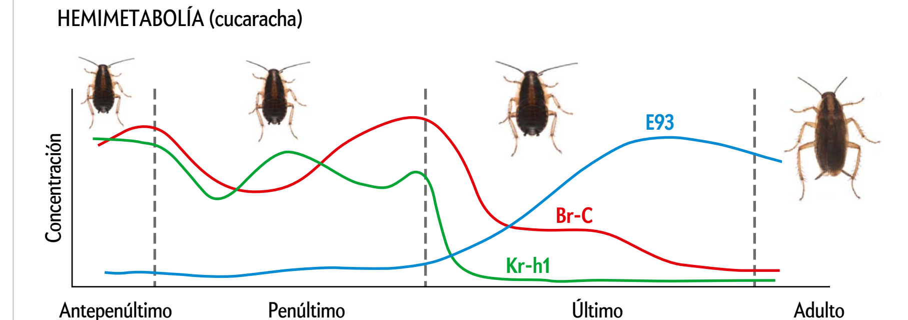
La cadena génica activada por la hormona juvenil es más simple que la de la ecdisona. También se inicia con la interacción con su receptor correspondiente, denominado Met, al que se le une el correceptor Tai. El complejo formado por la hormona juvenil, Met y Tai induce la expresión del gen *Kr-h1*, que codifica la proteína homónima, Kr-h1, inhibidora de la metamorfosis.

¿Cómo actúan estos mecanismos moleculares en los dos tipos de metamorfosis? La respuesta reside en la denominada vía molecular MEKRE93, la cual está constituida por tres proteínas principales que acabamos de comentar: Met, Kr-h1 y E93. Esta vía es la reguladora universal de la metamorfosis en todos los insectos. Su mecanismo clave fue elucidado por nuestro grupo de investigación al trabajar con la cucaracha rubia, que es he-

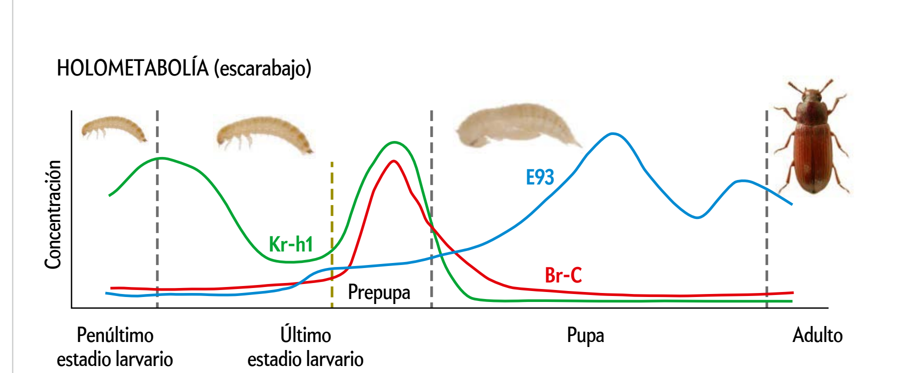
## Cambios moleculares

**La metamorfosis** está finamente regulada por el equilibrio entre dos hormonas, la hormona juvenil, que la reprime, y la ecdisona, que la activa. Estas hormonas ponen en marcha una cascada de reacciones moleculares que, en última instancia, provocarán las transformaciones morfológicas en el insecto. Aquí se ilustran las variaciones de concentración de las principales proteínas (E93, Br-C y Kr-h1) que intervienen al final de las cascadas moleculares en las dos metamorfosis: la hemimetábola (representada por la cucaracha rubia) y la holometábola (representada por el escarabajo rojo de la harina). La comparación de los perfiles moleculares en las dos metamorfosis permite deducir homologías entre fases e inferir su relación evolutiva.

HEMIMETABOLÍA (cucaracha)




HOLOMETABOLÍA (escarabajo)




Las concentraciones de las moléculas Kr-h1 (que impide la metamorfosis) y E93 (que la desencadena) se cruzan en la última fase ninfal de los hemimetábolos y en la pupa de los holometábolos. Ello indica que esas dos fases son funcionalmente homólogas.

Pero la principal diferencia entre los dos tipos de metamorfosis radica en la molécula Br-C. Sobre esta actúa de distinto modo la hormona juvenil, cuyo perfil es paralelo al de Kr-h1. Mientras que en los hemimetábolos la hormona estimula la producción de Br-C durante las fases ninfales, en los homometábolos la reprime hasta la fase de prepupa. En ella, la disminución de la hormona juvenil permite la producción de Br-C y se desencadena la formación de la pupa.



mimetábola. En concreto, observamos que en las transiciones ninfa-ninfa, la hormona juvenil, a través de Met, induce la expresión de *Kr-h1*; y que la molécula Kr-h1, a su vez, reprime la expresión de *E93*, lo cual determina que no se produzca la metamorfosis. Sin embargo, cuando la producción de la hormona juvenil cae en la última fase ninfal, se interrumpe la expresión de *Kr-h1*, lo que permite la expresión de *E93* y, por consiguiente, se desencadena la metamorfosis.

Posteriormente, la validez de la vía MEKRE93 se ha demostrado en otros insectos hemimetábolos. También se ha comprobado en los insectos holometábolos, aunque en su vía MEKRE93 correspondiente se añaden importantes interacciones con la proteína Br-C, que determina la formación de la fase de pupa.

De hecho, la principal diferencia a escala molecular entre las metamorfosis hemimetábola y holometábola es justamente la regulación y la función que ejerce la hormona juvenil sobre la proteína Br-C. En los insectos hemimetábolos, la hormona estimula la expresión de *Br-C*. Así, durante las fases ninfales se va produciendo Br-C, que va promoviendo el crecimiento de los primordios alares. Por el contrario, en los insectos holometábolos, la hormona juvenil reprime la expresión de *Br-C*. De ese modo, en las larvas no se produce Br-C, y tan solo empieza a generarse poco antes de la fase de pupa, momento en que estimula la formación de esta. Por lo tanto, el eje principal de la vía MEKRE93 (es decir, la activación de Kr-h1 por la hormona juvenil y Met, y la represión de E93 por Kr-h1) está conservado de igual modo en las especies hemimetábolas y las holometábolas, aunque las últimas han agregado el bucle de regulación de Br-C que desencadena la fase pupal (*veáse el recuadro* «Cambios moleculares»).

Simplificando mucho, la metamorfosis vendría determinada por la caída de Kr-h1, que la reprime, y el incremento de E93, que la desencadena. ¿Y cuándo sucede eso? Pues bien, los perfiles de expresión de *Kr-h1* y de *E93* se cruzan en la última fase ninfal en los hemimetábolos, y en la pupa en los holometábolos. Ello apunta claramente a que esas dos fases son funcionalmente homólogas, una conclusión que rinde homenaje a los trabajos pioneros de Hinton en la década de 1960 y a su teoría de la homología directa.

### EVO-DEVO DE LA METAMORFOSIS

Antes hemos visto las teorías que interpretan cómo fue la evolución de la metamorfosis por fuera, es decir, los cambios morfológicos que experimentaron las sucesivas fases de desarrollo de los

insectos. Ahora, con los datos de regulación de que disponemos a escala molecular, podemos aventurar cómo pudo haber sido por dentro. Es decir, cuáles podrían haber sido los mecanismos que propiciaron la emergencia de la hemimetabolía primero, y de la holometabolía después.

En cuanto a la hemimetabolía, ya hemos comentado que su emergencia es consustancial con la innovación de la muda final, la cual fue verosímilmente una consecuencia de la aparición de las alas. Así, los insectos con alas dejan de mudar cuando se convierten en adultos. Y dejan de hacerlo porque, poco después de alcanzar ese estadio, se desintegran las glándulas protorácicas, que segregan la ecdisona (la hormona de la muda). Tal y como hemos observado en nuestros trabajos recientes con la cucaracha rubia, la molécula E93 está implicada en la destrucción de dichas glándulas. Recordemos, además, que Br-C promueve el crecimiento de los primordios alares en las ninfas hemimetábolas, y que E93 también interviene en el desarrollo de las alas durante la metamorfosis. Además, sabemos que los genes que codifican esas moléculas están ya presentes en los insectos ametábolos, aunque se desconoce la función que ejercen estas en ellos.

Podemos conjeturar, pues, que en la transición evolutiva de los insectos ametábolos ápteros a los hemimetábolos alados, los genes *Br-C* y *E93* habrían adoptado nuevas funciones. Mientras que *Br-C* adquiriría el control del crecimiento de las alas en las ninfas, *E93* regularía la conversión final de la ninfa en adulto, así como la destrucción de las glándulas protorácicas inmediatamente después de alcanzarse ese estadio. Estas nuevas funciones habrían sido cruciales en la aparición de la metamorfosis incompleta.

Unos 50 millones de años después emergió la metamorfosis completa, impulsada por la ventaja selectiva que supuso la internalización de las estructuras adultas en los juveniles, en particular las alas. De hecho, para que surgiera la holometabolía se necesitaron dos cambios cualitativos simultáneos: por un lado, que dejaran de exteriorizarse las estructuras adultas en las fases juveniles (comenzando por las alas), lo que tendría como consecuencia la invención de la larva; por el otro, que esas estructuras se exteriorizaran en la etapa inmediatamente preadulta, con lo que se originaría la fase de la pupa.

¿Qué mecanismos moleculares habrían permitido esas dos modificaciones, que significaron el paso de la hemimetabolía a la homometabolía? Basándonos en datos recopilados por nuestro grupo, hemos propuesto lo que hemos denominado la hipótesis de Broad complex. Según esta, dichas modificaciones habrían surgido gracias a un cambio en la sensibilidad del gen *Br-C* a la hormona juvenil. Sabemos que en la ninfa hemimetábola esta hormona estimula la expresión de *Br-C* (que, a su vez, promueve el desarrollo de los primordios alares). Y también sabemos que, en la larva holometábola, la misma hormona ejerce el efecto contrario: reprime la expresión de *Br-C* hasta la etapa prepupal, cuando disminuye la hormona juvenil (en ese momento se produce Br-C, el cual desencadena la formación de la pupa, y con ella, la de las alas). Un mecanismo compatible con esas observaciones que explicase la transición de la hemimetabolía a la holometabolía sería que la acción de la hormona juvenil sobre la expresión de *Br-C* habría dejado de ser estimulante para convertirse en inhibidora.

Ese cambio de sensibilidad a la hormona, que habría operado en el ancestro común de todos los holometábolos, propiciaría la transformación de una ninfa con primordios alares en una larva áptera, debido a la ausencia de Br-C; y, al mismo tiempo, la aparición de una fase con alas, la pupa, debido a la producción de Br-C al final del último estadio larvario. Más adelante en la evolución, Br-C ampliaría sus funciones, desde aquella especializada en el desarrollo de las alas hasta un abanico de capacidades morfogenéticas que permitirían formar la pupa tal como la conocemos hoy.

El cambio de acción de la hormona juvenil sobre el gen *Br-C*, de estimuladora a inhibidora, no tendría por qué requerir grandes modificaciones genéticas. Podría resolverse con variaciones relativamente simples en la región promotora del gen, que es la que regula cuándo, cómo y dónde se expresará este. Esas pequeñas mutaciones habrían quedado fijadas en las especies por selección natural. Se trata de un ejemplo más de evolución biológica, de adquisición de nuevos rasgos a causa del azar y la necesidad; un ejemplo de evolución del desarrollo gracias a la propagación de versiones diferentes de genes viejos que confieren funciones nuevas y útiles para la supervivencia. En el caso que nos ocupa, tres antiguos genes, *Br-C*, *Kr-h1* y *E93*, ya presentes en el genoma de los primitivos pececillos de plata, habrían sido reutilizados para ejercer unas funciones novedosas que revolucionarían la historia evolutiva de los insectos.

Aunque pueda parecer que el misterio de la metamorfosis ya esté resuelto, quedan numerosas incógnitas por aclarar. Falta estudiar con mayor detalle cómo cambia el desarrollo del embrión entre el insecto hemimetábolo y el holometábolo, y cuál es la incidencia de la hormona juvenil en ese cambio. Debemos averiguar qué acción exacta ejerce la proteína E93 para que se produzca una morfología de adulto a partir de una inmadura. Queda por responder cuál es el papel que desempeñan los genes que regulan la metamorfosis, como *E93*, *Kr-h1* y *Br-C*, en los insectos ametábolos, que no experimentan metamorfosis. O cómo se produce el cambio de sensibilidad del gen *Br-C* a la hormona juvenil entre los hemimetábolos y los holometábolos.

No cabe duda de que los próximos años serán muy gratificantes, no solo porque despejarán esta lista de incógnitas, sino porque conllevarán nuevos descubrimientos que ahora no nos podemos ni imaginar. Sin duda, estos serán los más estimulantes, los que abrirán brechas insospechadas en la frontera del conocimiento de una innovación extraordinaria en la historia evolutiva de los insectos.


**PARA SABER MÁS**

**Evolution of insect metamorphosis.** František Sehnal, Petr Švácha y Jan Zrzavý en *Metamorphosis. Postembryonic reprogramming of gene expression in amphibian and insect cells*. Lawrence I. Gilbert et al. (eds.), Academic Press, San Diego, págs. 3-58, febrero de 1996.

**The origins of insect metamorphosis.** James W. Truman y Lynn M. Riddiford en *Nature*, vol. 401, n.º 6752, págs. 447-452, septiembre de 1999.

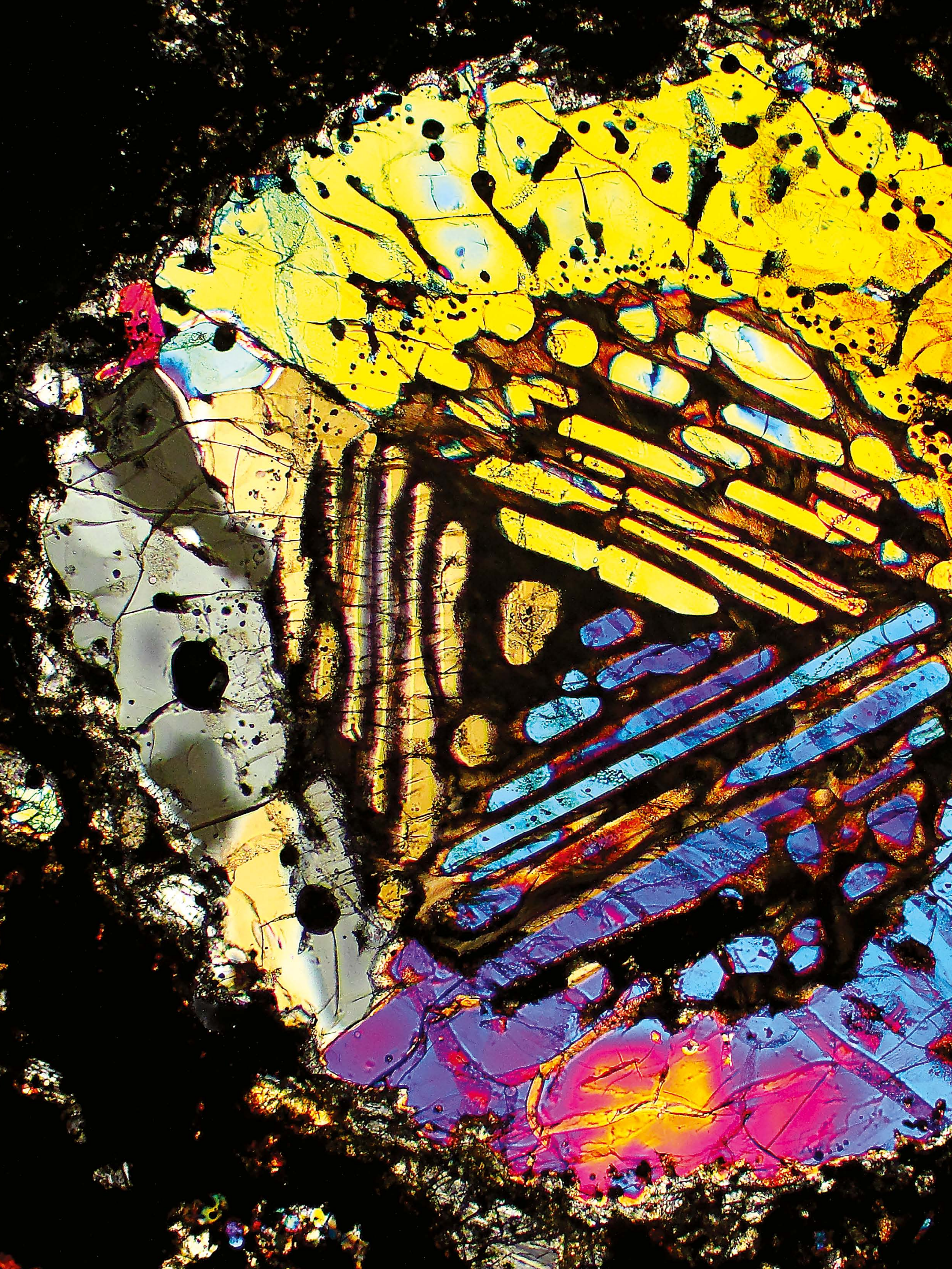
**Where did the pupa come from? The timing of juvenile hormone signalling supports homology between stages of hemimetabolous and holometabolous insects.** Marek Jindra en *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 374, artículo 20190064374, agosto de 2019.

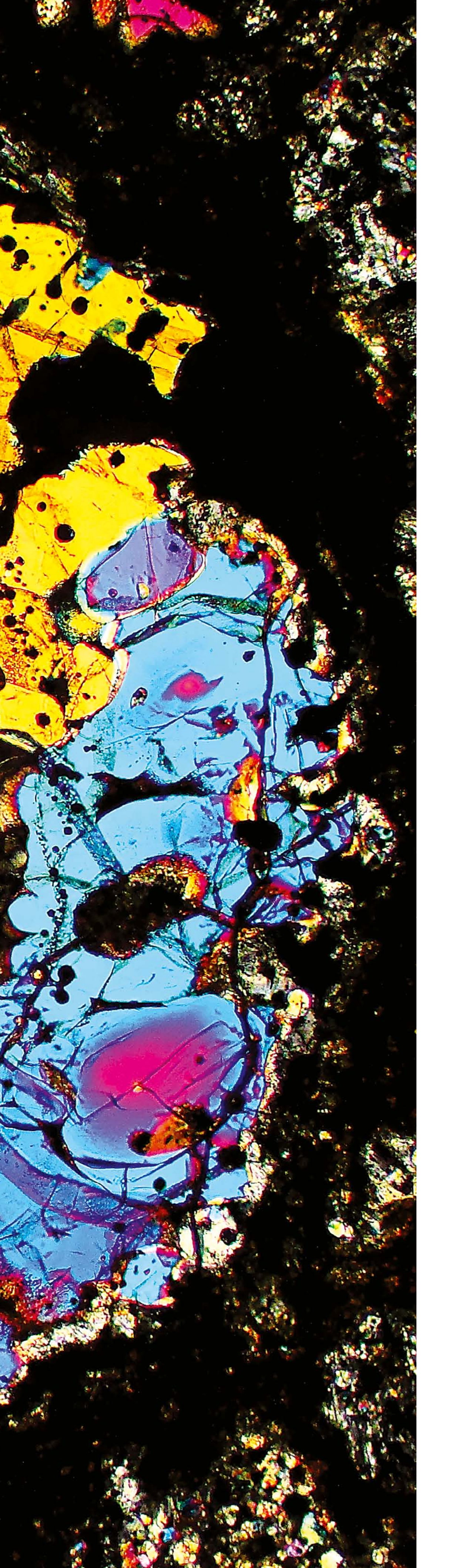
**The evolution of insect metamorphosis.** James W. Truman en *Current Biology*, vol. 29, n.º 23, págs. PR1252-R1268, diciembre de 2019.

**EN NUESTRO ARCHIVO**

**Una estirpe de rancio abolengo.** Xavier Bellés en **El mundo de los insectos.** VV.AA. Colección *Temas* de *IyC*, octubre/diciembre de 1995.

**Regulación hormonal de la metamorfosis en los insectos.** Xavier Bellés en *IyC*, octubre de 2015.





# La curiosa ciencia de los cóndrulos

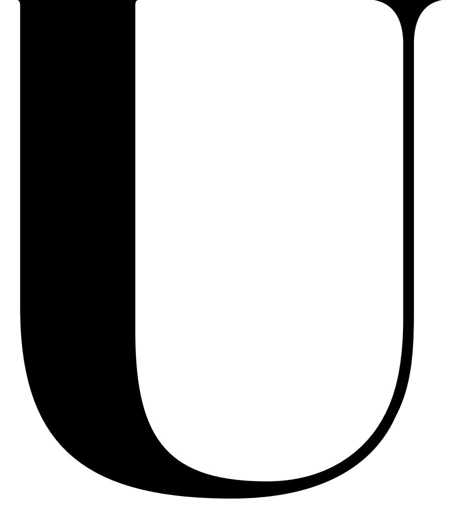
CIENCIAS PLANETARIAS

El material del asteroide Ryugu podría ayudarnos a descubrir el origen de esos enigmáticos objetos y lo que revelan sobre el nacimiento del sistema solar

*Jonathan O'Callaghan*



**Jonathan O'Callaghan** es periodista científico especializado en vuelos espaciales comerciales, exploración espacial y astrofísica.



NA CÁPSULA DEL TAMAÑO DE UNA TOSTADORA PENETRÓ EN NUESTRA atmósfera a 12 kilómetros por segundo, soportando temperaturas de 3000 grados Celsius durante su abrasador descenso antes de desplegar un paracaídas para reducir su velocidad. Luego continuó cayendo, hasta tocar tierra en el interior de Australia. En cuestión de horas, los científicos localizaron el lugar de aterrizaje mediante radar y acudieron allí en helicóptero para recuperar la cápsula, que contenía una cantidad sin precedentes de fragmentos de asteroide, recogidos a millones de kilómetros de la Tierra.

El evento tuvo lugar en la madrugada del 6 de diciembre de 2020 (hora local) y supuso el punto culminante de la misión Hayabusa2 de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) al asteroide Ryugu. Era tan solo la segunda ocasión en que una nave espacial regresaba a la Tierra con muestras de un asteroide (la primera fue su predecesora, la sonda Hayabusa, lanzada en 2003). Los científicos esperan usarlas para responder preguntas complejas sobre la historia del sistema solar y de nuestro propio planeta. ¿Qué edad tienen los asteroides como Ryugu? ¿Cuánta agua y material orgánico contienen? ¿Podrían haber traído a la Tierra la materia prima de la vida hace miles de millones de años?

Mientras la mayoría de los grupos que investigan Ryugu abordan esas formidables preguntas, un contingente más reducido se ocupa de otra cuestión aparentemente menor: ¿contienen las muestras de Hayabusa2 un misterioso ingrediente observado en casi todos los meteoritos conocidos? Nadie ha logrado explicar aún el origen de ese componente, pero hacerlo tendría importantes repercusiones: no solo desvelaría una parte difusa de la historia del sistema solar, sino también detalles desconocidos del proceso que dio origen al séquito de planetas de nuestro sol. Tal vez no haya nada más importante para comprender cómo se formó la Tierra (y cualquier otro planeta del cosmos) que el misterio de los cóndrulos.

Los cóndrulos son pequeñas rocas parecidas a semillas, de tan solo unos pocos milímetros de ancho. Creemos que se formaron hace unos 4500 millones de años, poco después del nacimiento del sistema solar, y luego se incrustaron en las condritas, unas rocas de mayor tamaño que representan la mayoría de los más de 60.000 meteoritos descubiertos por el hombre a lo largo de la historia.

«Los cóndrulos están por todas partes», señala Fred Ciesla, planetólogo de la Universidad de Chicago. Aun así, los científicos llevan casi dos siglos sin ponerse de acuerdo sobre cómo surgieron: algunos piensan que son subproductos de la formación planetaria, y otros, que constituyeron las semillas de ese mismo proceso. Sea como fuere, se han propuesto numerosos mecanismos de creación de cóndrulos, que van desde descargas eléctricas que habrían fundido los granos de polvo hasta colisiones entre fragmentos de protoplanetas o enormes ondas de choque que habrían calentado el gas al propagarse por la nube de material primordial que rodeaba al Sol recién nacido.

Así pues, comprender la formación de los cóndrulos podría esclarecer los primeros momentos del sistema solar. Y ahora, gracias a los resultados recientes o futuros de misiones como Hayabusa2 y de otras vías de investigación, los científicos fascinados por los cóndrulos están a punto de poder responder a la persistente pregunta sobre su procedencia (y quizás también la nuestra). «Son vidrieras que se asoman al período más antiguo del sistema solar», explica Harold Connolly, cosmoquímico y experto en cóndrulos de la Universidad Rowan. «Fueron testigos de los procesos que acontecían en el sistema solar primigenio. La pregunta es: ¿qué presenciaron?»

## GOTAS DE FUEGO

En 1802, el químico británico Edward Howard fue uno de los primeros científicos en identificar los cóndrulos como «glóbulos redondeados» en los meteoritos. Su nombre, impuesto más adelante por los mineralogistas Gustav Rose y Gustav Tschermak, proviene del griego *chóndros* («granos») y el alemán *kleine kugeln* («pequeñas esferas»). En 1877, el geólogo Henry Sorby caracterizó los cóndrulos con más detalle y los describió como «gotas de lluvia ardiente», glóbulos fundidos que se condensaron alrededor del Sol, aunque por entonces (igual que ahora) nadie sabía exactamente cómo se habían formado.

EN SÍNTESIS

**Los cóndrulos** son pequeñas rocas incrustadas en la mayoría de los meteoritos que caen a la Tierra.

**Figuran entre los objetos** más antiguos del sistema solar, pero no está claro cómo surgieron ni si contribuyeron a la formación planetaria o son subproductos de ella.

**Las misiones** de retorno de muestras de asteroides, junto a otras investigaciones, podrían ayudarnos a entender el origen de los cóndrulos y su papel en la génesis del sistema solar.

PÁGINAS ANTERIORES: JEFF HODGES




LOS CÓNDRULOS abundan en esta sección de Barratta, una condrita ordinaria de 203 kilogramos que cayó en Nueva Gales del Sur, Australia.

MATTEO CHINELLATO, ALAMY STOCK PHOTO

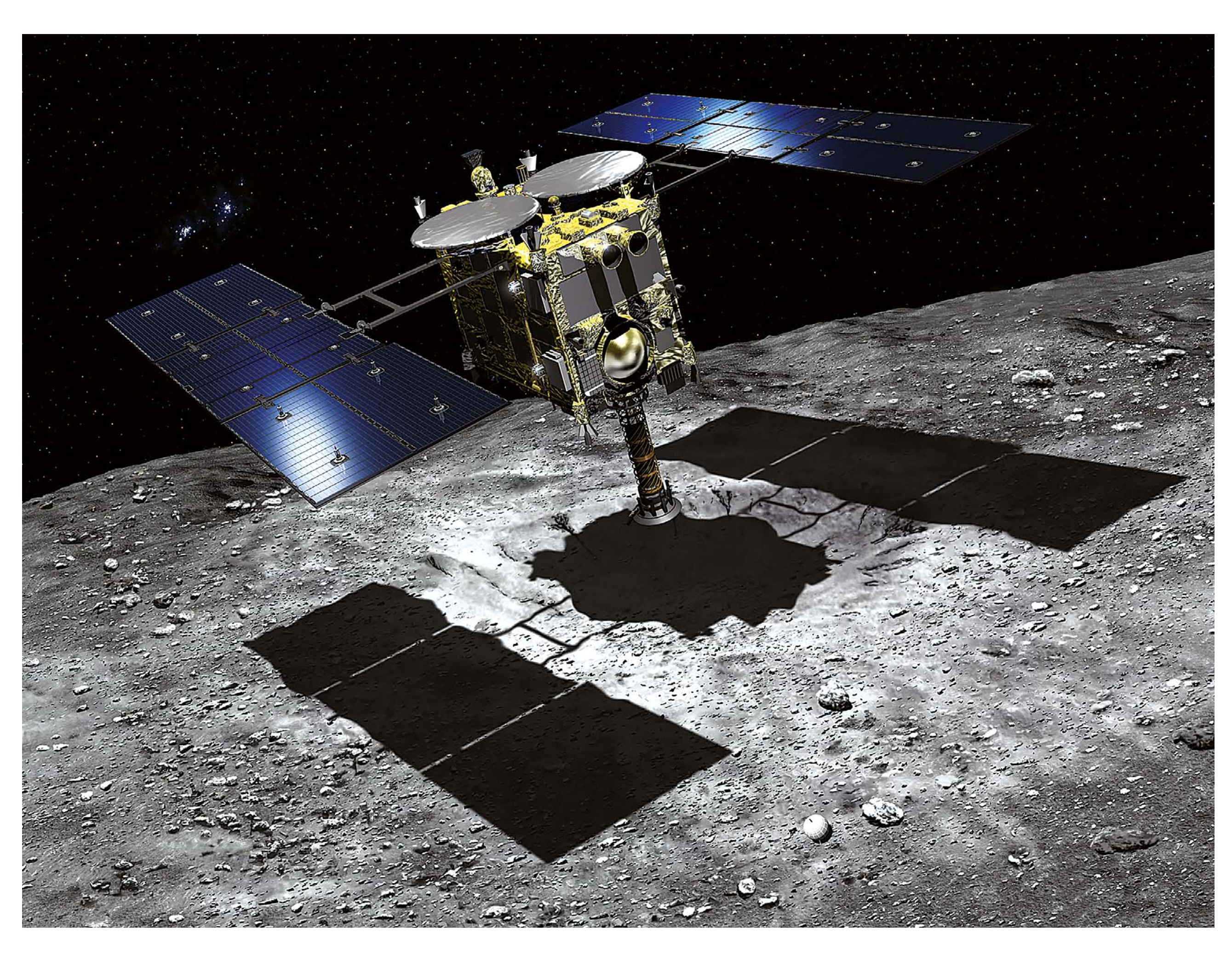
Las líneas generales de la génesis de nuestro sistema solar están más claras. La historia, que los científicos han reconstruido tras décadas de observación y modelización, comienza hace más de 4500 millones de años, cuando el colapso gravitatorio del polvo y el gas de una nube molecular gigante creó una protoestrella que se convertiría en el Sol. En el interior del disco giratorio de gas y polvo que envolvía a ese protosol, la gravedad, la aerodinámica y las fuerzas electrostáticas hicieron que los granos de polvo se unieran. De este modo se formaron agregados cada vez mayores, como los planetesimales, los cuerpos de escala kilométrica que, en unos pocos millones de años, se fusionaron para dar lugar a los planetas. Y estos mundos fueron adoptando poco a poco las formas y órbitas que vemos hoy en día. Pero, aunque conozcamos la historia a grandes rasgos, los detalles siguen siendo un misterio. Los cóndrulos aparecen en los primeros capítulos, en algún estadio intermedio entre el polvo y los planetesimales. ¿Cómo se pasa de unos granos microscópicos a mundos de miles de kilómetros de diámetro?

En esencia, los cóndrulos son rocas incluidas en otras rocas. Aparecen como motas redondeadas en los meteoritos condríticos y algunos pueden apreciarse a simple vista, mientras que otros solo se distinguen bajo el microscopio. Sería difícil exagerar la abundancia de los cóndrulos: pese a que no conocemos ninguno que haya sobrevivido al proceso de incorporación a los planetas, son muy comunes en el espacio y suelen constituir una gran parte del material de los meteoritos condríticos. Algunas condritas están tan llenas de cóndrulos que casi parecen un conglomerado de abalorios.

Hechos de minerales como el olivino y el piroxeno, y en ocasiones de vidrio, los cóndrulos presentan una diversidad de formas, tamaños y composiciones, y a menudo incluyen un deslumbrante conjunto de cristales. Midiendo su contenido en aluminio 26, un isótopo radiactivo de vida corta, los científicos han determinado que los cóndrulos se formaron en un período de unos pocos millones de años, hace unos 4567 millones de años. Su edad los convierte en los segundos objetos reconocibles más antiguos del sistema solar, después de las inclusiones ricas en calcio y aluminio, unas motas blancas observadas en los meteoritos que se habrían formado entre uno y tres millones de años antes, por condensación del gas que rodeaba a nuestro joven sol.

Existen muchas clases de condritas. Las ordinarias suponen más de nueve de cada diez rocas espaciales que contienen cóndrulos, y están repletas de ellos. Las condritas carbonáceas, que representan en torno al 4 por ciento de todas las condritas, suelen tener una gran cantidad de carbono, y se piensa que las más ricas en este elemento se formaron en el sistema solar exterior. Un grupo conocido como condritas CI posee solo cóndrulos microscópicos, porque el agua líquida que una vez fluyó por su cuerpo progenitor erosionó los de mayor tamaño. Y las condritas CB se distinguen por ser el único tipo cuyo origen concita un consenso casi universal. «Pensamos que esas condritas se formaron durante un tremendo impacto», detalla Sara Russell, planetóloga del Museo de Historia Natural de Londres. El hecho de que conozcamos su procedencia les confiere «cierta magia».

¿Y qué ocurre con el origen de las demás variedades de condritas? Sigue siendo una incógnita. «Resulta frustrante, pero



RECREACIÓN ARTÍSTICA de la sonda Hayabusa2, que tomó muestras del asteroide Ryugu en julio de 2019 y luego las trajo a la Tierra.



también tiene su gracia que lo ignoremos», valora Russell. «Es obvio que dan testimonio de un proceso ubicuo y trascendental relacionado con la formación de nuestro sistema solar. Solo tenemos que averiguar cuál.»

### UN PROBLEMA IMPOSIBLE

En la Conferencia de Ciencia Lunar y Planetaria celebrada en Houston en el año 2000, una audiencia atónita presenció cómo John A. Wood, que por entonces trabajaba en la Universidad Harvard y es uno de los científicos más respetados en el campo de los meteoritos, parecía darse por vencido en cuanto a comprender el origen de los cóndrulos. Como muchos de sus predecesores, Wood quedó fascinado por los cóndrulos a primera vista. «Esas bolitas de piedra eran tan atractivas, interesantes y misteriosas que me sedujeron», rememora. Pero le frustraba la falta de avances. «Aún no entendemos qué nos cuentan los meteoritos, y a veces me pregunto si llegaremos a entenderlo», escribió en el resumen de su ponencia. Unos años más tarde, ante la falta de financiación, optó por jubilarse y se centró en pintar al óleo y pasar tiempo con su esposa. «Dejé la ciencia de un día para otro», relata Wood.

Su discurso desconcertó a muchos científicos. «Vino a decir que había desperdiciado su vida estudiando los cóndrulos, porque entrañaban un problema imposible de resolver», comenta Conel Alexander, cosmoquímico del Instituto Carnegie para la Ciencia. «Y eso contrarió a mucha gente.» Larry Nittler, otro cosmoquímico del Instituto Carnegie, se hallaba entre el público y afirma que «se puso en pie» para defender la investigación de los cóndrulos. «Dije: “Todavía me entusiasman esas increíbles rocas procedentes del espacio”», recuerda. «Creo que nunca he recibido tanta atención o elogios en toda mi carrera. La sala entera estalló en aplausos.»

El pesimismo de Wood resulta comprensible. Al fin y al cabo, los científicos espaciales han logrado resolver un buen número de misterios en apariencia inabordables. Han reconstruido los primeros instantes del universo, descubierto mundos alrededor de otras estrellas, detectado ondas gravitacionales y captado imágenes de un agujero negro. El pertinaz enigma de los humildes cóndrulos, que ya pertenece a un ámbito muy especializado, parece empequeñecerse aún más ante tales logros. Se dice en broma que hoy hay tantas teorías sobre la formación de los cóndrulos como científicos que los estudian. Y mañana, inevitablemente, habrá más.

El problema de los cóndrulos siempre ha sido intergeneracional y ha inspirado a una hornada tras otra de científicos, que se han enfrentado a la cuestión con distintos grados de éxito. El principal obstáculo es encontrar un modelo capaz de explicar las variopintas propiedades de los cóndrulos. «Ningún modelo cumple todos los requisitos», lamenta Alexander. Para que se formaran los cóndrulos, algún proceso del sistema solar

primigenio tuvo que calentar el polvo, que habría alcanzado temperaturas de hasta 2000 grados Celsius antes de enfriarse rápidamente en cuestión de días o incluso horas. Lo más seguro es que ese proceso, fuese cual fuese, se produjera en todo el sistema solar: esa parece la única manera de explicar la gran abundancia de cóndrulos que muestran las condritas caídas a la Tierra. Los reveladores anillos de polvo acumulado que hallamos en el centro de los cóndrulos indican que también debieron de vagar durante un tiempo por los alrededores polvorientos de nuestro incipiente sol.

En general, los expertos en cóndrulos se dividen en dos bandos. Unos creen que los cóndrulos fueron de los primeros cuerpos sólidos en aparecer en el sistema solar y que se formaron directamente a partir de la nebulosa solar (la nube de polvo y gas que rodeaba al joven Sol), por lo que supondrían un eslabón fundamental entre el polvo diminuto y los planetesimales de dimensiones kilométricas. Otros, en cambio, piensan que los cóndrulos surgieron después que los planetesimales, y quizás incluso después que los propios planetas. Así, constituirían subproductos del proceso de formación planetaria en vez de una parte activa del mismo.

Dentro del primer bando, una teoría postula que las inestabilidades gravitatorias del disco de polvo y gas que circundaba el Sol generaron frentes de choque, los cuales fundieron parte del polvo para formar cóndrulos. «Si observamos la imagen de una galaxia, vemos que la rodean unos brazos espirales, y lo mismo habría ocurrido en el disco protoplanetario», expone Rhian Jones, cosmoquímica de la Universidad de Manchester. «Y pueden producirse frentes de choque asociados a las diferencias de densidad entre esos brazos, en los que el material está más agrupado, y el gas.»

**Hoy hay tantas teorías sobre la formación de los cóndrulos como científicos que los estudian. Y mañana, inevitablemente, habrá más**

Un modelo más radical plantea que la fricción entre el polvo y las partículas de gas que giraban en torno al Sol provocó inmensas descargas eléctricas que fundieron el polvo en cóndrulos, aunque no está claro cómo se habrían originado esos relámpagos nebulares. Otros modelos proponen fábricas de cóndrulos surgidas a partir de «láminas de corriente», corrientes eléctricas confinadas en superficies por la acción de los enormes campos magnéticos presentes en el disco protoplanetario. Esos puntos calientes podrían haberse extendido a lo largo de decenas o cientos de miles de kilómetros y habrían derretido los granos de polvo para generar los glóbulos primordiales.

En cuanto a la segunda corriente, la de quienes defienden que los cóndrulos se formaron después que los planetesimales, uno de los principales modelos es el de los chorros producidos por impactos, que sostiene que los planetesimales chocaron entre sí a altas velocidades y generaron el calor necesario para crear los cóndrulos. «Eso habría expulsado un chorro de material fundido que pudo dividirse en gotas», explica Brandon Johnson, planetólogo de la Universidad Purdue. Una variante de esta idea propone colisiones a velocidades más bajas entre objetos fundidos, en las cuales se habrían liberado al espacio gotas que luego se solidificarían en forma de cóndrulos.

Por su parte, el modelo de los arcos de choque, u ondas de proa, postula que los embriones planetarios del tamaño de Marte que se movían por la nebulosa podrían haber actuado como barcos surcando las aguas y haber fundido el polvo para dar lugar a los cóndrulos. «Conforme se desplazaban a través del gas a velocidades supersónicas, generaban una onda de proa», aclara Steven Desch, astrofísico de la Universidad Estatal de Arizona. «El polvo precursor de los cóndrulos se calentaba y era procesado al penetrar en el gas caliente comprimido.»

Otra posibilidad es el calentamiento por radiación, una propuesta relativamente nueva según la cual los planetesimales podrían haberse calentado al pasar cerca de cuerpos fundidos y haber producido cóndrulos al enfriarse. Las rocas sometidas a ese tratamiento térmico natural serían más resistentes y tendrían más opciones de sobrevivir al atravesar la atmósfera terrestre, lo cual explicaría por qué la mayoría de los meteoritos que descubrimos son condritas. «Los meteoritos se endurecieron, y la atmósfera de la Tierra actúa como un filtro que permite el paso de objetos muy densos y duros», apunta William Herbst, astrónomo de la Universidad Wesleyan y uno de los investigadores que desarrollaron la idea.

Frente a esta oleada de teorías, ya se han descartado otros planteamientos más drásticos. Se contemplaron algunos fenómenos extrasolares, como los estallidos de rayos gamma (explosiones ultraenergéticas producidas en eventos como las fusiones de estrellas de neutrones o agujeros negros), una posibilidad que ahora parece inverosímil debido a las grandes distancias implicadas. Pero todavía quedan muchos modelos, y el hecho de que la formación planetaria no prediga necesariamente la aparición de los cóndrulos complica aún más las cosas. «Podemos construir un relato sobre cómo surgieron los planetas sin hacer ninguna mención a los cóndrulos», afirma Ciesla. «Es evidente que estamos pasando por alto una parte de la historia.»

Determinar cuál de las posibles teorías es la correcta no es fácil y puede suscitar acalorados debates. «La mejor manera de hacer amigos y enemigos en el campo de los meteoritos es publicar otro modelo de formación de cóndrulos», asegura Connolly. Lo que se dirime es la función que desempeñaron los cóndrulos en nuestro sistema solar. Si fueron de los primeros sólidos en aparecer, entonces alrededor del joven Sol tuvo lugar un proceso ineludible que podría explicar cómo comienzan a formarse los planetas en la mayoría de las estrellas. Pero si no lo fueron, ¿significa eso que su importancia para la génesis planetaria es menor de lo que pensábamos?

«A día de hoy, apuesto por las colisiones», se pronuncia Eugene Chiang, planetólogo de la Universidad de California en Berkeley. «Y, para ser franco, eso los hace un poco menos interesantes. Porque, si consideramos la formación planetaria, los cóndrulos no serían los objetos más primitivos, sino productos secundarios.»

### FABRICAR CÓNDRULOS

La mayoría de nuestras ideas sobre la formación de los cóndrulos provienen de los modelos del sistema solar primigenio y de los

experimentos realizados en la Tierra para reproducir diferentes mecanismos de formación. Aimee Smith, experta en meteoritos de la Universidad de Manchester, y sus colaboradores integran uno de los grupos de investigación de todo el mundo que llevan a cabo tales experimentos. El equipo mezcla productos químicos a fin de generar un polvo con una composición similar a la de los distintos cóndrulos conocidos, y luego introduce ese polvo en un horno y lo calienta a temperaturas muy altas durante horas o días, antes de enfriarlo para simular diversos modelos de formación. «Si obtenemos objetos parecidos a los cóndrulos naturales que hemos estudiado, entenderemos mejor cómo aparecieron», señala Smith.

Esos experimentos están diseñados para ir de la mano con la modelización del sistema solar. «Los experimentos definen las condiciones asociadas a los cóndrulos», comenta Jones, que colabora con Smith. «Y los modelos tratan de hallar supuestos que cumplan esas condiciones.» Dicha modelización está comenzando a dibujar una nueva imagen de los primeros momentos del sistema solar.

Los últimos estudios sobre las relaciones isotópicas de los meteoritos apuntan a la creación temprana de dos reservas distintas de condritas, una en el sistema solar interior y otra en el exterior, donde los cóndrulos podrían haber surgido por separado. Ambas poblaciones se habrían mezclado después de que Júpiter, que se formó más cerca del Sol e inicialmente migró hacia él, invirtiera su rumbo hasta alcanzar su posición actual, una hipótesis conocida como la «Gran Virada» [*véase* «Nacido del caos», por Konstantin Batygin, Gregory P. Laughlin y Alessandro Morbidelli; Investigación y Ciencia, julio de 2016]. De ser cierto, eso sugeriría que la turbulenta historia del sistema solar está registrada en el interior de los propios cóndrulos, lo que supone un motivo más para brindarles toda nuestra atención.

Las observaciones de otros sistemas solares (en especial de los discos protoplanetarios de polvo y gas que rodean a las estrellas jóvenes) también aportan información sobre posibles mecanismos de formación de cóndrulos. En 2014, el astrofísico Huan Meng, a la sazón estudiante de doctorado en la Universidad de Arizona, y sus colaboradores notificaron un destello de luz infrarroja en las inmediaciones de la estrella NGC-2547 ID8, situada a más de 1000 años luz de la Tierra, lo cual podría indicar un violento choque entre protoplanetas. Aunque no es seguro que esta observación esté relacionada con la generación de cóndrulos, al menos sirvió para demostrar que en los sistemas jóvenes parecen producirse colisiones con la energía suficiente para crearlos. «Antes de nuestro artículo, no existía ninguna prueba sólida y directa de un impacto planetario extrasolar», destaca Meng.

En el futuro, los astrónomos deberían poder estudiar la distribución de polvo alrededor de las estrellas jóvenes con imágenes de mayor resolución, lo que serviría para refinar algunos modelos de formación de cóndrulos. «Gracias a las mejoras en las técnicas y los telescopios, empezamos a distinguir la producción de polvo en torno a estrellas jóvenes», señala Yves Marrocchi, planetólogo del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia. «Quizás en un futuro próximo logremos ver el proceso de formación de los cóndrulos.» Uno de los instrumentos que podrían permitirlo es el telescopio espacial James Webb de la NASA, cuyo lanzamiento ha sufrido varios retrasos y está previsto para octubre.

Si los cóndrulos fueron de los primeros sólidos en constituirse alrededor de las estrellas, quizá actuaran como catalizadores de la ulterior formación planetaria, en concreto del salto desde objetos con el tamaño de una mota de polvo a otros de dimensiones kilométricas. «Existe una brecha donde necesitamos cuerpos de varios metros o kilómetros para componer los progenitores rocosos de los planetas», indica Connolly. «Lo que suceda en esa brecha es muy importante.» Y es posible que los cóndrulos sean aún más cruciales: un modelo de formación planetaria postula que los objetos más grandes crecieron hasta convertirse en planetas mediante la «acreción de guijarros» de polvo. ¿Puede que esos guijarros fueran en realidad los cóndrulos? «No lo sabemos», admite André Izidoro, planetólogo de la Universidad Rice. Para descubrirlo seguramente necesitaríamos «una gran muestra de un asteroide», añade. Y resulta que acabamos de obtener una.

## NO HAY UNA RESPUESTA SENCILLA

Las primeras exploraciones revelaron que Hayabusa2 consiguió traer de vuelta más de 5 gramos de material del asteroide Ryugu. Según Shogo Tachibana, líder del equipo de análisis de muestras de la JAXA, esa cantidad debería ser más que suficiente para comprobar si hay cóndrulos. Su grupo comenzó a estudiar las muestras a principios de año, después de su traslado desde Australia a Japón, aunque aún habrá que esperar para conocer sus resultados. «No sabemos si los cóndrulos de Ryugu son distintos a los de otras condritas», recalca Tachibana. El asteroide parece similar a las condritas carbonáceas halladas en la Tierra, así que la mayoría de los expertos confían en que las muestras presenten cóndrulos. No obstante, en el momento de redactar este artículo, todavía no está claro si serán como los que ya figuran en nuestras colecciones o exhibirán características inéditas.

También puede que las muestras de Hayabusa2 no contengan cóndrulos. «Creo que eso desconcertaría a los expertos», asegura Herbst. «Si no tuvieran cóndrulos ni indicios de haberlos tenido, eso podría implicar que la formación de cóndrulos no es un proceso tan ubicuo», razona Russell.

Los resultados preliminares del módulo de aterrizaje MASCOT, que Hayabusa2 envió a Ryugu en octubre de 2018, ya han cautivado a los científicos. En las imágenes que captó el módulo se apreciaban numerosas marcas blancas en la superficie, que podrían ser inclusiones ricas en calcio y aluminio, pero también cóndrulos. «Nos sorprendió poder ver esas marcas y que hubiera tantas», reconoce Ralf Jaumann, director del equipo científico de MASCOT en el Centro Aeroespacial Alemán. No comprenderemos su naturaleza hasta que se realicen estudios químicos de las muestras transportadas a la Tierra.

Si las muestras de Hayabusa2 contienen cóndrulos similares a los ya estudiados por los científicos, será posible determinar el lugar, el momento y quizás incluso las condiciones en que se formaron. Por contra, si se observan nuevos tipos de cóndrulos, podrían brindarnos otra perspectiva sobre el problema más amplio del origen del sistema solar. Algunos científicos, como Connolly, ven con buenos ojos esa posibilidad. «Espero de veras que las muestras nos deparen algunas sorpresas y encontremos objetos inesperados», admite. Y aun si no presentaran cóndrulos, eso podría indicar tan solo que el agua que se volvió líquida debido al calor de las desintegraciones radiactivas, los impactos y otras fuentes borró hace tiempo los indicios de sus cóndrulos, algo similar a lo que ocurrió con las condritas CI halladas en la Tierra.

Hayabusa2 no es la única misión de toma de muestras con obsequios extraterrestres para los expertos en cóndrulos. La nave espacial OSIRIS-REx de la NASA tiene previsto regresar a la Tierra en septiembre de 2023 con las muestras que ha tomado



UN MIEMBRO DE LA MISIÓN HAYABUSA2 transporta la cápsula de retorno de muestras de la nave espacial tras recuperarla cerca de Woomera, en Australia, en diciembre de 2020.

JAXA VÍA AP PHOTO

recientemente en el asteroide Bennu, que deberían de ser ricas en cóndrulos. «Sería muy decepcionante que no encontráramos cóndrulos en ese material», confiesa Connolly, que también forma parte del equipo de OSIRIS-REx. «Espero hallar cóndrulos conocidos y desconocidos.»

Si los investigadores lograran determinar de manera concluyente cómo se formaron los cóndrulos, eso podría ayudar a dilucidar si resultaron cruciales para la posterior creación de la Tierra y el resto de planetas de nuestro sol. Suponiendo, claro está, que la historia que revelen sea relativamente sencilla. Pero algunos expertos sospechan que no se hallará ninguna solución simple, en parte porque no hay una única teoría correcta. «No creo que la respuesta vaya a ser concisa», opina Sarah Stewart, planetóloga de la Universidad de California en Davis. «Es probable que se formaran muchas gotas de distintas maneras.» Russell coincide: «Mi teoría favorita es que todo el mundo tiene razón. Todos esos procesos se produjeron en alguna parte del sistema solar. Hubo ondas de choque, colisiones, ondas de proa y descargas eléctricas. Creo que tuvieron lugar todos esos fenómenos y que todos ellos generaron objetos similares a los cóndrulos».

Y eso puede significar que Wood iba bien encaminado cuando hizo su chocante declaración de futilidad en las postrimerías de su carrera: si casi todas las teorías de formación de cóndrulos reflejan un proceso que ocurrió realmente en la historia temprana del sistema solar, tal vez no haya diferencias profundas entre ellas. Pero esa posibilidad no impedirá que las nuevas generaciones lo sigan intentando, como hicieron sus predecesores. «Si tuviera que empezar de nuevo, habría hecho lo mismo», sostiene Wood. ¿Y qué le diría a quien quiera seguir sus pasos? «Le desearía buena suerte.» IyC

PARA SABER MÁS


**The importance of experiments: Constraints on chondrule formation models.** Steven J. Desch et al. en *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 47, págs. 1139-1156, julio de 2012.
**Chondrules: The canonical and noncanonical views.** Harold C. Connolly Jr. y Rhian H. Jones en *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 121, págs. 1885-1899, octubre de 2016.
**Chondrules: Records of protoplanetary disk processes.** Sara S. Russell, Harold C. Connolly Jr. y Alexander N. Krot. Cambridge University Press, 2018.


EN NUESTRO ARCHIVO


**Meteoritos primitivos.** Alan E. Rubin en *IyC*, abril de 2013.
**Condritas carbonáceas, mensajeros del pasado.** Josep Maria Trigo, Carles E. Moyano y Marina Martínez en *IyC*, agosto de 2015.
**Siete años de misión para reunir 60 gramos de asteroide.** Dante S. Lauretta en *IyC*, septiembre de 2016.

ECOLOGÍA

# LOS ESTRAGOS DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

EL RESPLANDOR de las aglomeraciones urbanas dispersado por la atmósfera y las nubes crea un halo luminoso visible a decenas o incluso cientos de kilómetros. Esta contaminación lumínica afecta a los entornos naturales, incluso los alejados. En la imagen, panorámica de la poblada llanura del Véneto (Italia) desde la cumbre del Monte Grappa (1775 m). La cruz visible a contraluz culmina un mausoleo dedicado a los soldados caídos en la montaña durante la Primera Guerra Mundial.

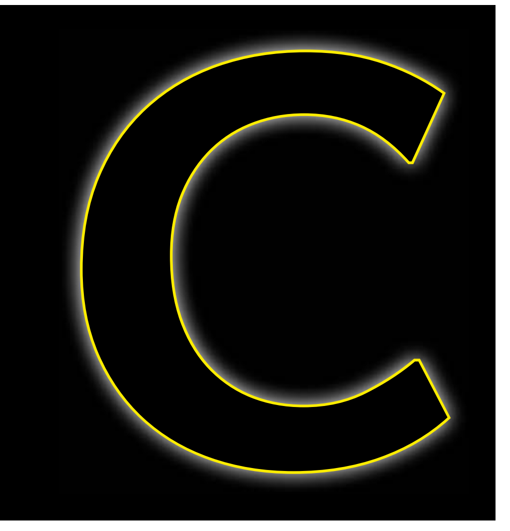
Cada vez escasean más los lugares donde domina la oscuridad nocturna. La luz artificial perturba de muchas maneras la vida animal, hasta el extremo de contribuir al declive general de la biodiversidad

*Emmanuel Desouhant, Thierry Lengagne y Nathalie Mondy*

**Emmanuel Desouhant** es profesor de la Universidad de Lyon I e investigador del Laboratorio de Biometría y Biología Evolutiva.

**Thierry Lengagne** es investigador del CNRS en el Laboratorio de Ecología de los Hidrosistemas Naturales y Antropizados, de la Universidad de Lyon I.

**Nathalie Mondy** es profesora titular de la misma universidad e investigadora del citado laboratorio de ecología.



UANDO LA LUZ DEL DÍA SE DESVANECE, LA TEMPERATURA CORPORAL DEL lémur ratón gris (*Microcebus murinus*) aumenta varios grados mientras se dispone a buscar alimento. Este pequeño primate nocturno de Madagascar es un ejemplo entre muchos: animales y plantas viven al ritmo de la alternancia del día y de la noche. De manera más general, la luz y la luminosidad ambiental ejercen una gran influencia en los seres vivos. Multitud de procesos fisiológicos, comportamientos e interacciones en el seno de los ecosistemas dependen de ella y de sus ciclos diarios y estacionales.

La gente suele pensar en el sol cuando se alude a los efectos de la luz natural sobre los seres vivos, olvidando que las fuentes nocturnas, la luna y las estrellas también pueden influir en su comportamiento. Tal es el caso de las tortugas marinas recién nacidas en la playa, de noche, que se sirven de la visión para encaminarse al mar. Gracias a su capacidad para captar la tenue diferencia de brillo entre ambos lados de la playa (el horizonte marino refleja más luz que el terrestre), se orientan correctamente en este momento crucial de su vida.

Pero desde hace un siglo la oscuridad de la noche cede terreno ante la iluminación artificial, que gana tanto en extensión como en intensidad. La generalización de la luz nocturna plantea una pregunta fundamental: ¿en qué medida perturba a los organismos vivos, a sus poblaciones y sus interacciones?

Ya hace mucho tiempo que surgieron las primeras señales preocupantes. En Norteamérica existe constancia de la mortandad de aves que se produce en las cercanías de los faros marítimos desde la década de 1920. Y los astrónomos llevan alertando desde los años setenta del siglo pasado que la expansión de la luz artificial nocturna dificulta sus observaciones. Pero ha habido que esperar al último decenio para que los científicos se dieran cuenta cabal del fenómeno y se interesaran resueltamente por sus consecuencias en la fauna y la flora. Desde entonces los estudios se han multiplicado. Presentamos aquí algunos resultados. Aparte de medir el impacto de la luz artificial en las especies urbanitas, el reto que encaran las investigaciones es descubrir el efecto que la luminosidad tenue que baña los ambientes naturales alejados de las urbes ejerce sobre la biodiversidad.

### UN NUEVO ACTOR AMBIENTAL

La luz artificial nocturna es producto de la actividad humana y de las fuentes de luz que la sociedad moderna instala: farolas urbanas y viarias, faros de vehículos, carteles publicitarios, iluminación doméstica y laboral, etc. Esta iluminación directa y localizada genera una claridad indirecta y difusa, de baja intensidad pero con un vasto alcance: es el origen del halo luminoso que emana de las aglomeraciones urbanas y que llega a ser visible en el cielo a decenas o cientos de kilómetros de la zona bañada por la luz directa. Un halo que ciertas condiciones atmosféricas como las cubiertas de nubes acentúan al favorecer la dispersión de la luz.

La intensificación de la iluminación que trae consigo el desarrollo urbano constituye una nueva perturbación ambiental. La luz artificial nocturna se extiende con rapidez, con un

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/ELLEON/ISTOCK

EN SÍNTESIS

**La luz artificial** está cada vez más presente durante la noche, incluso en las regiones alejadas de las grandes aglomeraciones urbanas.

**El impacto** de la contaminación lumínica sobre la fauna es objeto de estudio desde hace pocos años.

**La luz** artificial nocturna perturba los mecanismos hormonales, el comportamiento, las interacciones y la orientación de los animales, entre otros aspectos.

**Es probable, pues,** que sea un factor importante en la pérdida de biodiversidad. Para limitarla son posibles diversas líneas de actuación.

aumento de la superficie afectada cercano al 6 por ciento anual. Así que, teniendo en cuenta la difusión del halo luminoso, en 2016 cerca del 23 por ciento de la superficie de los continentes y el 0,2 por ciento de la superficie oceánica estaban sometidas a esta perturbación.

Dichas estimaciones se han obtenido a partir de datos satelitales, que han permitido a un grupo de físicos dirigido por Fabio Falchi, del Instituto de Ciencia y Tecnología de la Contaminación Luminosa, con sede en Thiene (Italia), elaborar un atlas mundial de la luz artificial nocturna cuya última versión data de 2016.

Los datos reunidos por el equipo muestran que la intensidad lumínica nocturna en Europa varía por un factor de 6800 entre la región menos afectada y la más contaminada por la luz artificial. Por ejemplo, en Francia ya no existen regiones en las que el cielo esté exento de contaminación, es decir, donde la luminosidad nocturna haya aumentado menos de un 1 por ciento con respecto a la natural. Lejos de ser exclusiva del país galo, tal situación se hace extensiva a la mayoría de los países desarrollados. Véase sino el mapa de la página siguiente: ¡son tan pocos los lugares donde se puede gozar de una noche negra para admirar la bóveda celeste y la Vía Láctea!



LAS FAROLAS del alumbrado público matan una cantidad colosal de insectos.

GETTY IMAGES/SUTLAFK/ISTOCK

Además de proyectar luz durante un período en que los seres vivos suelen permanecer inmersos en la oscuridad, las fuentes artificiales emiten longitudes de onda distintas a las procedentes del sol, la luna o las estrellas. Las antiguas farolas de vapor de sodio tienen un espectro de emisión más bien estrecho, en la zona del anaranjado, pero las nuevas fuentes de diodos electroluminiscentes (ledes de luz blanca) presentan un amplio espectro de emisión que se extiende hacia el azul. Por esta razón, las especies quedan expuestas a longitudes de onda que pocas veces, o nunca, han encontrado a lo largo de su evolución, así que es lógico preguntarse por su capacidad de adaptación a esas nuevas fuentes.

### LA MELATONINA, PRINCIPAL OBJETIVO HORMONAL

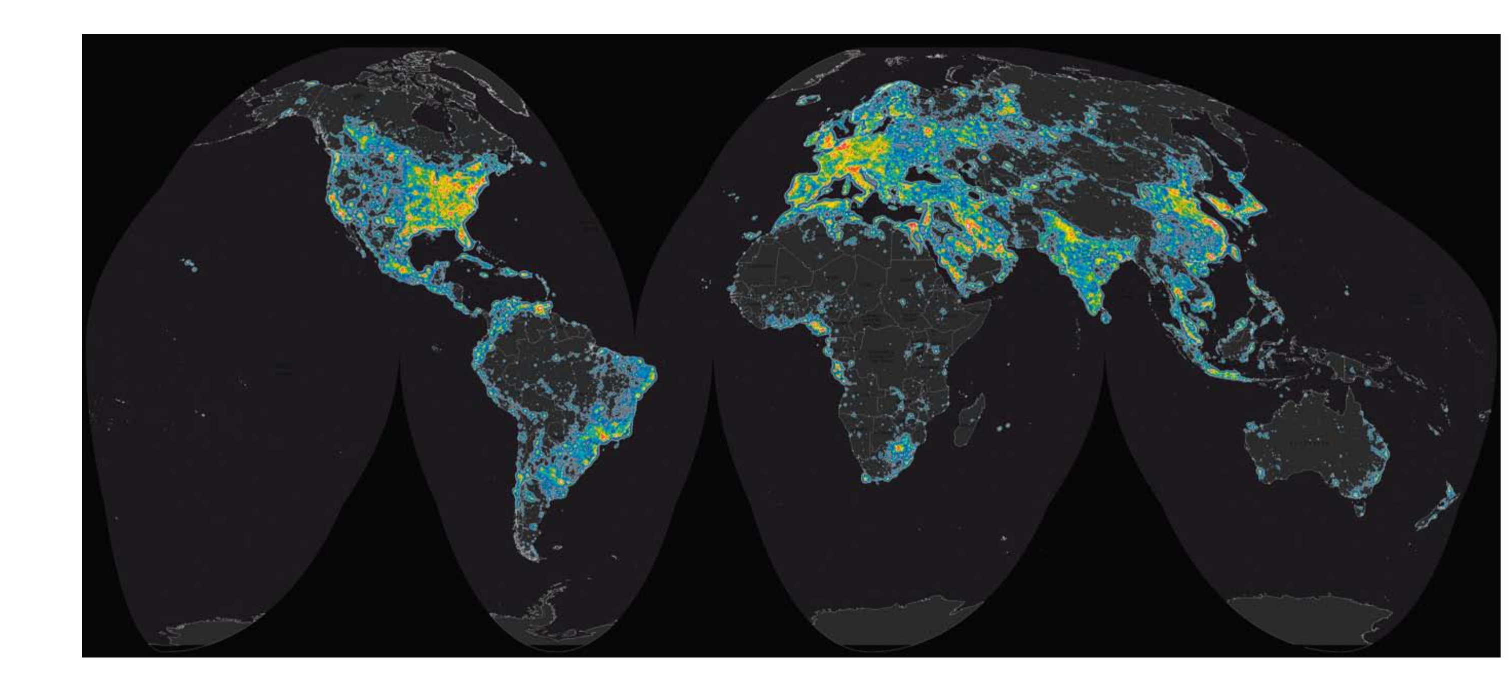
La luz artificial nocturna supone un nuevo factor ambiental ante el que cabe preguntarse cuál será la reacción y la adaptabilidad de los vegetales y los animales, incluido el ser humano.

La respuesta exige saber en qué influye la luz artificial durante la noche. Hoy ya se sabe que altera los ritmos circadianos que regulan la cronología de actividades diversas, como son la alimentación, la sexualidad, la vigilia y el sueño, amén del metabolismo energético animal. Morgane Touzot, estudiante posdoctoral en nuestro laboratorio de ecología, demostró en un artículo de 2019 que una contaminación nocturna de 5 lux induce en el sapo común (*Bufo bufo*) una disminución drástica (–56 por ciento) de la actividad locomotora de los machos en celo y un aumento del metabolismo basal (+28 por ciento) desde la primera noche de exposición.

Esos ritmos circadianos dependen de un conjunto de genes cuyo funcionamiento está modulado en gran parte por la melatonina, la principal diana hormonal de la iluminación nocturna. La glándula pineal, ubicada en el cerebro, secreta esta hormona generalmente por la noche, dado que la luz diurna inhibe su síntesis a partir del aminoácido triptófano. Si bien la duración y la intensidad con que se libera varían según las especies, la secreción de melatonina refleja la duración de la noche, de ahí que constituya un indicador del fotoperiodo, esto es, de la duración de la luz diurna.

El equipo de Marcel Visser, del Instituto de Ecología de los Países Bajos, describió en un trabajo de 2016 que la producción de melatonina queda suprimida o reducida en el carbonero común (*Parus major*) cuando es expuesto a una luz nocturna que varía de 0,05 a 5 lux. Se han obtenido resultados parecidos en numerosas aves y mamíferos, como el ualabí tammar (*Macropus eugenii*), un pequeño marsupial nocturno del sur de Australia, y en algunos peces, como la perca sol (*Lepomis gibbosus*).

Veamos con más detenimiento el caso del ualabí tammar. En esta especie muy sensible a la duración del día, el nacimiento de las crías está sincronizado por la luz natural y tiene lugar en la sexta semana después del solsticio estival. En un estudio publicado en 2015 por Kylie Robert, de la Universidad La Trobe, en Melbourne, y sus colegas, la comparación de dos poblaciones de la costa oriental australiana (una expuesta a la luz artificial nocturna y la otra no) reveló un mes de retraso en el máximo de nacimientos en la zona contaminada por la luz. El crecimiento del embrión va ligado normalmente a cambios mínimos en la duración de la noche, que las madres ya no pueden percibir en las zonas afectadas por la contaminación. Como en todos los animales, los nacimientos suelen coincidir con la máxima abundancia de alimento, por lo que cualquier desfase acusado de tiempo suele tener graves consecuencias para la supervivencia de las crías y el mantenimiento de las poblaciones.



El impacto biológico de la luz artificial depende de su intensidad, pero también de las longitudes de onda a las que se ve expuesta la fauna. Según los trabajos difundidos estos últimos años por Jenny Ouyang, de la Universidad de Nevada, y sus colaboradores, las longitudes cortas y medias como el azul (emitidas por los ledes blancos), inducen en el ser humano, los roedores, las aves y los peces una reducción más fuerte de la síntesis de melatonina que las longitudes de onda largas, como el naranja-rojo.

### UNA NUEVA FORMA DE DISRUPTOR ENDOCRINO

La percepción alterada de la duración del día repercute notablemente en la reproducción estacional al desregular la producción de las hormonas sexuales. En numerosas especies la duración del día marca la señal de inicio para la actividad reproductora en primavera y, dado que la luz artificial nocturna aumenta la duración percibida, la estación de cría se adelanta. Así se constata en numerosas aves que habitan en las zonas urbanas, con relación a sus congéneres rurales.

A inicios de la década pasada, Davide Dominoni y sus colaboradores, del Instituto Max Plack de Ornitología en Alemania, llevaron a cabo una investigación con el fin de evaluar los efectos a largo plazo de la luz nocturna. Para ello sometieron a unos mirlos (*Turdus merula*) a una luminosidad nocturna débil (0,3 lux) de forma ininterrumpida durante dos años. Los ejemplares expuestos mostraron el primer año un ciclo gonadal funcional, si bien más precoz que los pájaros del grupo testigo. Pero el segundo año su aparato reproductor no se desarrolló: el tamaño de los testículos y la concentración de testosterona se mantuvieron en los mismos niveles registrados fuera de la época de cría.

Puesto que la luz artificial nocturna afecta al funcionamiento de muchos sistemas endocrinos, se puede considerar una nueva forma de «disruptor endocrino». En los vertebrados puede incluso provocar, tanto de forma directa como a través de la alteración de la secreción de melatonina, una hipersecreción de hormonas del estrés (glucocorticoides).

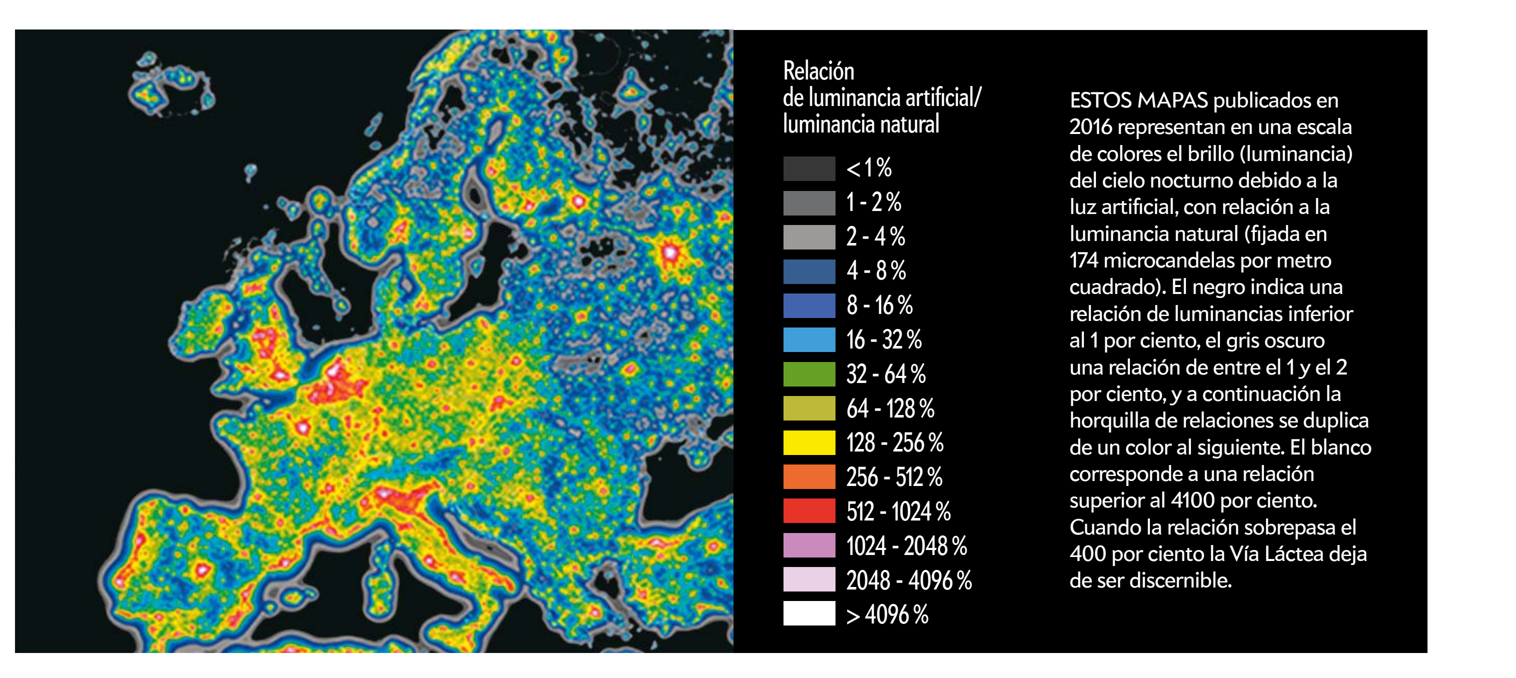
Jenny Ouyang y sus colegas observaron este fenómeno en 2015 en polluelos de carbonero común criados en un ambiente natural con luz blanca durante la noche, que compararon con otros criados en la oscuridad nocturna o con luz verde o roja. Resulta que la elevación crónica de los glucocorticoides suele debilitar las defensas inmunitarias, aunque este aspecto no se estudió en los carboneros.

Y esa no es la única vía capaz de alterar el sistema inmunitario. Joanna Durrant y sus colegas de la Universidad de Melbourne descubrieron en un estudio de 2019 que la luz nocturna también merma la inmunidad del grillo australiano *Teleogryllus commodus*. Esto no sería demasiado novedoso si no fuera porque, a semejanza de los demás insectos y los artrópodos en conjunto, los grillos no producen glucocorticoides. Se puede adelantar, pues, que el efecto nocivo de la contaminación lumínica sobre la inmunidad parece ser general, aunque aún no se hayan precisado los mecanismos implicados.

Además, la luz artificial nocturna modifica el comportamiento de numerosos animales: a algunos los atrae (fototaxis positiva) y a otros los repele. Las especies con fototaxis positiva son particularmente vulnerables, pues una vez atraídas quedan entrampadas por la fuente luminosa y no logran alejarse. Ocurre sobre todo en los insectos.

Gerhard Eisenbeis, de la Universidad Johannes Gutenberg, y Andreas Hänel, del Museo de Osnabrück, en Alemania, publicaron en 2009 trabajos donde mostraban que las farolas clásicas, dotadas de lámparas de vapor de sodio, atraían por término medio en el sudoeste del país a un centenar de insectos cada noche estival. Se trata esencialmente de dípteros (moscas y mosquitos), coleópteros y lepidópteros (mariposas diurnas o nocturnas). Alrededor del 30 al 40 por ciento de los individuos atraídos mueren rápidamente, ya sea achicharrados al contacto con la lámpara, ya sea por deshidratación. Los demás suelen quedar atrapados por la luz y abandonan toda búsqueda de alimento o de pareja.

Para hacerse una idea de la magnitud del daño, tomemos el ejemplo de Francia. Según la Asociación Francesa del Alumbrado, en aquel país hay 9 millones de puntos de alumbrado público. Una sencilla multiplicación indica que en un solo verano ¡extermina más de 2 billones de insectos! Y para colmo




ESTOS MAPAS publicados en 2016 representan en una escala de colores el brillo (luminancia) del cielo nocturno debido a la luz artificial, con relación a la luminancia natural (fijada en 174 microcandelas por metro cuadrado). El negro indica una relación de luminancias inferior al 1 por ciento, el gris oscuro una relación de entre el 1 y el 2 por ciento, y a continuación la horquilla de relaciones se duplica de un color al siguiente. El blanco corresponde a una relación superior al 4100 por ciento. Cuando la relación sobrepasa el 400 por ciento la Vía Láctea deja de ser discernible.

habría que sumar el alumbrado privado: escaparates, luces domésticas, polígonos industriales, etc. Aunque aproximada, la cifra demuestra que el alumbrado nocturno afecta de manera notable a la biodiversidad: los insectos forman parte de los primeros eslabones de la cadena trófica y constituyen el alimento básico de numerosos vertebrados, en especial de aves, así como de otros artrópodos.

### ATRAPADAS Y DESORIENTADAS

Las aves pagan asimismo un fuerte tributo por la contaminación lumínica. Más de la mitad de las especies migratorias viajan de noche, guiadas por la bóveda celeste o por el campo geomagnético, de modo que el exceso de luz nocturna altera su comportamiento e interfiere en su sistema de orientación. Un estudio publicado en 2017 por Benjamin Van Doren y sus colaboradores, del Laboratorio de Ornitología de Cornell, en Estados Unidos, lo demuestra. Con la ayuda de radares y captadores acústicos evaluaron el efecto de los dos haces luminosos que simbolizan las torres gemelas del World Trade Center, en Nueva York. Estimaron que este monumento intangible, llamado Tribute in Light, había «cazado» la friolera de 1,1 millones de aves durante los 49 días de seguimiento, repartidos entre 2008 y 2016.

Muchas se agotan al girar en redondo y cierto número de ellas caen al suelo o acaban chocando contra los edificios. La organización no gubernamental Fatal Light Awareness Program ha calculado así que, cada año, únicamente en la ciudad canadiense de Toronto, de 1 a 10 millones de aves migratorias perecen por colisión con los inmuebles, siendo las estructuras iluminadas de noche particularmente mortíferas.

| FUENTE | LUMINANCIA (LUX) |
|---|---|
| Cielo soleado | 103.000 |
| Cielo parcialmente soleado | 50.000 |
| Cielo nuboso de día | 1000 - 10.000 |
| Vivienda (interior) | 100 - 300 |
| Farolas (en carretera) | ~10 - 40 |
| Farolas (en zonas residenciales) | 5 - 10 |
| Luna llena (noche despejada) | 0,3 |
| Halo luminoso (*skyglow*) | ~0,15 |
| Noche estrellada (sin luna) | ~0,001 |

VALORES DE LUMINANCIA (intensidad luminosa que incide por unidad de superficie) asociados a diversas fuentes de luz natural y artificial. Se expresa en lux, que equivale a un flujo luminoso de 1 lumen por metro cuadrado. (A título indicativo, un led doméstico de 4,5 vatios emite un flujo cercano a 500 lúmenes.)

Por último, otros muchos animales emplean la luz natural nocturna como medio de orientación. Es el caso de algunos coleópteros, como el escarabajo pelotero, que se orienta gracias a la Vía Láctea, o de las tortugas marinas, como se ha comentado al inicio del artículo. En ambos ejemplos la contaminación lumínica perturba la orientación: el escarabajo tendrá dificultades para encontrar su fuente de alimento y las tortugas recién nacidas darán la espalda al mar y se dirigirán hacia los aparcamientos y las carreteras del litoral, engañadas por la potencia de las fuentes de luz artificial.

Otra consecuencia de la excesiva claridad nocturna y de los cambios de comportamiento que esta provoca en la fauna es la modificación de las interacciones entre las especies. Gracias a su ciclo biológico generalmente corto, los insectos son un grupo zoológico que se presta al estudio de este aspecto: es posible obtener datos sobre la dinámica de poblaciones y el funcionamiento de las comunidades en plazos de tiempo razonables.

Según la intensidad y la composición espectral de la luz artificial, y la sensibilidad de los organismos expuestos a ella, determinados grupos de insectos corren más riesgo de depredación en las zonas iluminadas. Así, en 1999, Astrid Heiling, de la Universidad de Viena, comparó el comportamiento tejedor de las arañas *La-*



LAS TORTUGAS MARINAS (aquí tortugas bobas, *Caretta caretta*) que nacen de noche en las playas han de alcanzar el mar cuanto antes. Se guían por la diferencia de luminosidad entre el horizonte marino y el terrestre (la superficie del mar refleja más la tenue luz ambiental). La iluminación artificial de la costa altera dicha orientación.

*rinioides sclopetarius*, comunes cerca del agua y sobre puentes. De manera sorprendente, estos artrópodos nocturnos prefieren tender las telarañas en zonas iluminadas artificialmente, donde capturan más presas que en la oscuridad. De modo similar, otros investigadores han demostrado que la atracción de los insectos por la luz de las farolas y su concentración en derredor modifica la distribución espacial de los murciélagos, que, en busca de aquellos, también se congregan cerca de los puntos luminosos.

### COMUNIDADES TRASTORNADAS

La luminosidad nocturna no altera solo la distribución espacial de las especies, modifica también su distribución temporal. Las especies de hábitos nocturnos entran en competencia con especies diurnas que prolongan su actividad durante una parte de la noche iluminada y eso puede perturbar de manera duradera la composición y el funcionamiento de los conjuntos de especies interrelacionadas (comunidades). Un estudio de campo de tres años publicado en 2017, a cargo del grupo de Kevin Gaston, de la Universidad de Exeter, lo ha demostrado.

En dicho estudio se evaluó el impacto de la iluminación nocturna con ledes blancos sobre la estructura y la composición de poblaciones de arañas y coleópteros que viven bajo y sobre el suelo. A lo largo de los tres años las abundancias relativas de las especies cambiaron enormemente con relación a las condiciones testigo, tanto de día como de noche. Además, la densidad de individuos de las especies depredadoras aumentó bajo los puntos iluminados. Tales resultados muestran a las claras que la luz nocturna artificial afecta a los niveles supraindividuales de organización de los seres vivos, como las comunidades.

¿La contaminación lumínica amenaza o reduce las poblaciones de ciertas especies? Las pruebas directas de su repercusión en el tamaño de las poblaciones no abundan, pero, a la vista de los efectos observados en los individuos y en las relaciones interespecíficas, no cabe esperar sino efectos negativos. A este respecto, un estudio publicado en 2018 por Frank van Langevelde, de la Universidad de Wageningen, en los Países Bajos, y sus colegas sugiere que la luz nocturna es una de las culpables de la disminución de las mariposas nocturnas constatada durante el período 1985-2015 en ese país: las más afectadas son las que muestran una fuerte fototaxis positiva.

A finales de 2019, Brett Seymoure, de la Universidad Estatal de Colorado, y sus colaboradores reunieron en una publicación numerosos argumentos, avalados por estudios, que señalan a la luz artificial nocturna como un factor tan importante como subestimado del rápido declive de los insectos, a causa de su acción perturbadora sobre los movimientos, el desarrollo, la alimentación y la reproducción.

Además del impacto sobre la biodiversidad, la claridad nocturna puede perjudicar a los servicios que los ecosistemas brindan a la humanidad. Eva Knop, de la Universidad de Berna, junto con sus colaboradores, presentó una elegante demostración de ello en 2017. En un experimento de campo con parcelas iluminadas y otras sumidas en la oscuridad natural, demostraron explícitamente los efectos simultáneos que la luz artificial nocturna ejerce en las redes de polinizadores nocturnos y diurnos. Las nuevas interacciones trabadas en las zonas iluminadas entre unos y otros, que en circunstancias normales no coincidirían, redujeron la cantidad de flores visitadas de noche, pero también de día, lo cual resulta más sorprendente. En consecuencia, la producción de semillas se desplomó.

La salud humana tampoco parece escapar a los efectos de la contaminación lumínica. Existen sospechas verosímiles en torno a ciertos tipos de cáncer. Y como efectos indirectos que incidirían en ella destacan las enfermedades transmitidas por insectos. Acerca de esta cuestión, un estudio de 2012 demostró que la infestación de las viviendas por la chinche hematófaga *Triatoma dimidiata*, vector de la enfermedad de Chagas, era notablemente mayor en las inmediaciones de los lugares provistos de alumbrado público en tres pueblos mexicanos.

¿Tiene siempre consecuencias negativas la claridad nocturna? Quizá no, puesto que algunos animales se aprovechan de ella. Ya hemos visto que algunos murciélagos sacan partido de la luz artificial y tienden a cazar cerca de las farolas, que actúan como un imán para los insectos. Cabe citar también los trabajos



EL *TRIBUTE IN LIGHT*, monumento luminoso erigido en Nueva York en recuerdo del atentado del 11 de septiembre de 2001, perturba notablemente a las aves que migran de noche. Un equipo de investigadores ha estimado en 1,1 millones la cantidad de aves que cayeron en la trampa que supone este memorial durante los 49 días que duró el seguimiento, repartidos en años distintos.

GETTY IMAGES/ISTOCK (*tortugas marinas*); GETTY IMAGES/MICHAEL VER SPRILL/ISTOCK (*Tribute in light*)

publicados en 2018 por Roy van Grunsven y sus colegas, del Instituto de Ecología IGB, en Berlín, que demuestran que determinadas babosas aprovechan la luz artificial para alimentarse de noche, con más éxito en la búsqueda de sustento y menos riesgo de depredación.

A pesar de todo, el optimismo queda fuera de lugar si estos resultados se comparan con los numerosos indicadores negativos. Pero se necesitan estudios a largo plazo para establecer un balance riguroso y objetivo. Estos trabajos permitirán describir y cuantificar las modificaciones de las interacciones (tróficas, competitivas, etc.) en el seno de las comunidades biológicas, para así predecir el impacto sobre el funcionamiento de los ecosistemas y las trayectorias evolutivas que las especies tomarán, algunas de las cuales podrían abocar a la extinción.



## ¿DE QUÉ REMEDIOS DISPONEMOS?

Aunque a día de hoy no se conozca bien la magnitud de las transformaciones que la contaminación lumínica provoca en los ecosistemas, las alteraciones son tantas que se hace indispensable el concierto entre responsables políticos, legisladores, científicos y ciudadanía.

En Francia, la Asociación Nacional para la Protección del Cielo y del Ambiente Nocturnos (ANPCEN) milita desde 1999 por el respeto de la noche y del ambiente nocturno. Esta entidad ha desempeñado un papel primordial en la adecuación de la legislación francesa en materia de iluminación nocturna (Acuerdos sobre el ambiente; Ley sobre la transición energética; y Ley para la reconquista de la biodiversidad, la naturaleza y los paisajes). Al ser el alumbrado público una competencia de los municipios, son estos los encargados de ajustar la duración, la intensidad y la calidad de la iluminación nocturna, aunque deleguen la gestión en un sindicato de energía.

Los municipios disponen de muchos mecanismos para limitar la contaminación lumínica. En cientos de ellos se programa el alumbrado para que se apague durante buena parte de la noche, cuando la actividad humana y la necesidad de luz disminuyen. Estos municipios podrían beneficiarse de un sello de calidad de «ciudades y pueblos estrellados», lo que supondría una verdadera reflexión local sobre los perjuicios que causa la iluminación.

Las mejoras en el diseño contribuyen igualmente a limitar la contaminación: todos tenemos presentes las farolas de bola, que proyectan gran parte de la luz hacia el cielo, no hacia la calzada. Y si bien es cierto que de unos años a esta parte se ha repensado la iluminación pública, con reflectores y formas que concentran el haz luminoso en la zona útil, quedan por modernizar millones de farolas. Además, el éxito de los ledes en el alumbrado público tiene efectos perversos. Por un lado, algunos municipios aprovechan el ahorro energético que reportan para ampliar los puntos de iluminación. Por otro, como se ha dicho, la emisión de los ledes suele tener un importante componente de luz azul que altera la secreción de melatonina: habría que optar por ledes que emitiesen luz más cálida (anaranjada-ambarina).

También es posible coordinar acciones a una escala superior. A fin de garantizar el funcionamiento de algunos observatorios astronómicos se han adoptado las primeras medidas destinadas a la reducción a gran escala de la contaminación lumínica. En 2007 se inauguró en Canadá, cerca del observatorio de Mont-Mégantic, la primera reserva internacional de cielo estrellado (RICE). Ello se tradujo en una reducción drástica de los niveles de luz nocturna en los 25 municipios situados alrededor del observatorio. En Francia se crearon con el mismo objetivo dos reservas: la del pico de Midi de Bigorra, en 2013, y el parque nacional de Cévennes, en 2018. Y por último, en los últimos años se está trabajando con el concepto de «trama negra», con el fin de identificar y preservar una red ecológica que por su oscuridad sirva como refugio para la fauna nocturna.

En España la iniciativa pionera en defensa del cielo nocturno y el derecho a la noche estrellada también arrancó en 2007 con la declaración Starlight, cuyos objetivos promueve la fundación del mismo nombre, creada por el Instituto de Astrofísica de Canarias con el apoyo de la UNESCO y la IAU. La fundación otorga certificaciones en forma de reservas o destinos turísticos Starlight, que también se conceden a enclaves en otros países.

En definitiva, existen soluciones al problema de la contaminación lumínica, cuyo alcance es cada vez más importante. Con algunos esfuerzos sería posible conservar las noches oscuras y paliar los efectos nefastos de la luz artificial nocturna. IyC

**PARA SABER MÁS**


**The biological impacts of artificial light at night: From molecules to communities.** K. J. Gaston et al. (dir.), monografía de *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 370, n.º 1667, mayo de 2015.
**The new world atlas of artificial night sky brightness.** F. Falchi et al. en *Science Advances*, vol. 2, n.º 6, e1600377, junio de 2016.
**Why artificial light at night should be a focus for global change research in the 21st century.** T. W. Davies y T. Smyth en *Global Change Biology*, vol. 24, n.º 3, págs. 872-882, marzo de 2018.
**Mechanistic, ecological, and evolutionary consequences of artificial light at night for insects: Review and prospective.** E. Desouhant et al. en *Entomologia Experimentalis et Applicata*, vol. 167, n.º 1 (special issue: minireviews), págs. 37-58, enero de 2019.
**Light pollution is a driver of insect declines.** Avalon C.S. Owens, et al. en *Biological Conservation*, vol. 241, artículo 108259, enero de 2019.
**Light pollution in USA and Europe: The good, the bad and the ugly.** F. Falchi, et al. en *Journal of Environmental Management*, vol. 248, artículo 109227, octubre de 2019.


**EN NUESTRO ARCHIVO**


**La melatonina.** Juan M. Guerrero, A. Carrillo-Vico y Patricia J. Lardone en *IyC*, octubre de 2007.
**Navegación animal.** M.ª Luisa Fanjul y Aldi de Oyarzábal en *IyC*, diciembre de 2007.
**La iluminación artificial desajusta nuestro reloj biológico.** Juan Antonio Madrid en *IyC*, septiembre de 2015.
**La frustrada revolución nocturna de los ledes.** Jan Hattenbach en www.investigacionyciencia.es, 26 de noviembre de 2017.

por Joan J. Fornós y Antoni Merino

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

# Espeleotemas freáticos

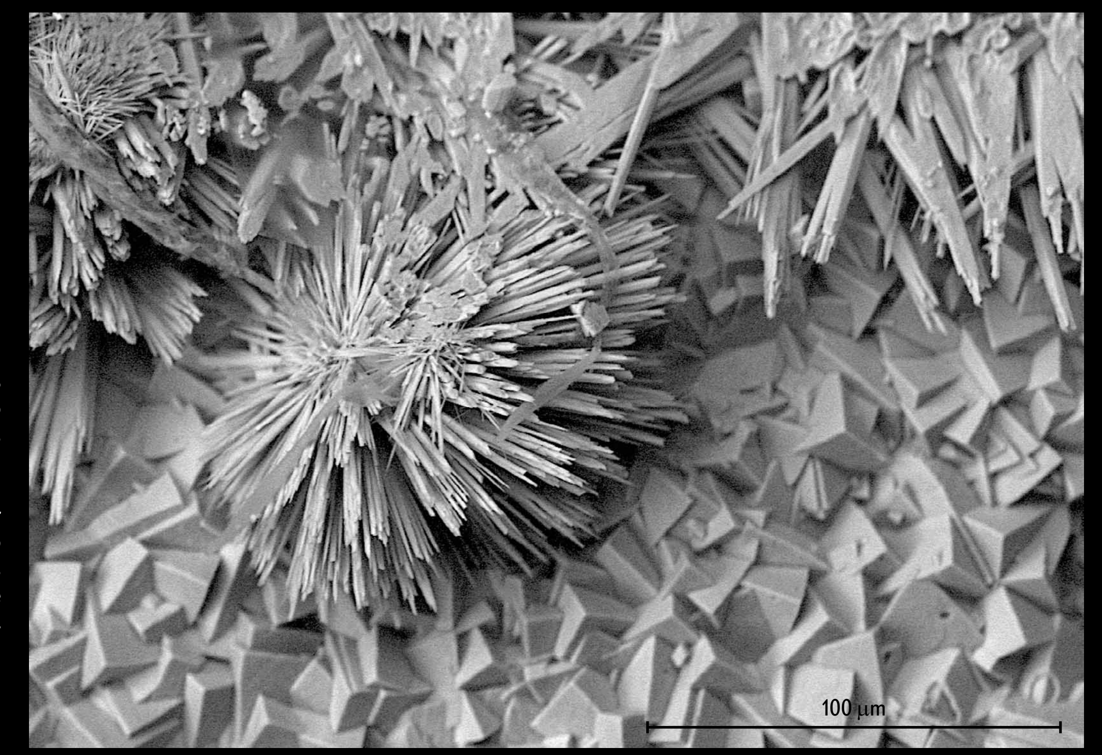
## En las cuevas litorales de Mallorca se forma un tipo peculiar de depósitos cristalinos. Su estudio permite conocer cambios pretéritos del nivel del mar

La isla de Mallorca está constituida principalmente por rocas carbonatadas, lo que explica la abundancia de cuevas kársticas en el litoral. Estas cuevas, formadas en su mayor parte por la interacción entre las aguas meteóricas (procedentes sobre todo de la lluvia) y las marinas en el subsuelo, aportan una información valiosa sobre los cambios en el pasado del nivel del mar Mediterráneo.

Una de las morfologías más peculiares de las cuevas son lo que se conoce como sobrecrecimientos freáticos sobre espeleotemas, o simplemente, espeleotemas freáticos. Estos corresponden a agregados cristalinos, tanto de aragonito como de calcita, depositados sobre otras superficies rocosas, como las paredes de la cavidad u otros tipos de formaciones (como estalactitas o estalagmitas). Estos depósitos en forma de bandas horizontales se originan por la desgasificación del $CO_2$ en la superficie de los lagos de aguas salobres que hay en las cuevas litorales. Puesto que el nivel altimétrico de estos lagos está controlado por la posición del nivel marino, los espeleotemas freáticos son buenos indicadores del nivel del mar, tanto actual como del pasado. De este modo, las antiguas bandas de cristalizaciones, localizadas por encima y por debajo del presente nivel de los lagos salobres, representan un registro excelente de las líneas de costa pretéritas del Mediterráneo. También permiten inferir la variabilidad en el pasado del nivel del mar y de la capa de hielo en el conjunto del planeta, un conocimiento muy útil para predecir el futuro ascenso del mar como consecuencia del calentamiento global.

A partir del estudio de los espeleotemas freáticos y su datación mediante técnicas radiométricas, nuestro grupo, en colaboración con otros, ha estimado el nivel medio marino del Mediterráneo y el global durante la transición entre el período Plioceno y el Pleistoceno (hace entre 5,5 millones y 2,5 millones de años aproximadamente)**,** en la que se pasó de un clima más cálido a más frío. Nuestros resultados, publicados en *Scientific Reports*, muestran que el Mediterráneo, justo antes de la denominada crisis de salinidad del Messiniense (iniciada hace unos 6 millones de años y en el que el mar se desecó) tenía un nivel del mar similar al más alto registrado durante el máximo térmico del Plioceno, esto es, más de una veintena de metros superior al actual, produciéndose desde entonces un descenso continuado. El valor estimado del nivel marino global en la transición del Plioceno al Pleistoceno es de unos 6 metros superior al actual, lo que señala asimismo un importante descenso inmediatamente después de ese momento.

*—Joan J. Fornós y Antoni Merino pertenecen al Grupo de Ciencias de la Tierra, en la Universidad de las Islas Baleares, y son miembros de la Sociedad Espeleológica Balear*




**LOS PRECIPITADOS** de calcita y aragonito de los espeleotemas freáticos pueden reproducirse de forma experimental al exponer una placa de vidrio en la superficie de los lagos salobres de las cuevas litorales.

SOBRE LA SUPERFICIE DE ESTAS ESTALACTITAS de la Cueva del Pas de Vallgornera se han depositado en tiempo reciente sobrecrecimientos de espeleotemas freáticos de naturaleza aragonítica.

LAS BANDAS DE CRECIMIENTO de estos espeleotemas freáticos en las cuevas de Artà muestran antiguos niveles marinos muy por encima del actual (*flechas*).

por Francisco José Soler Gil



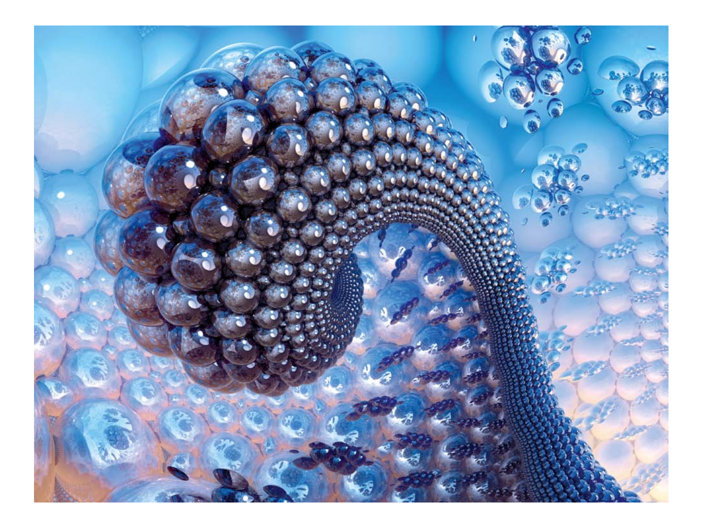
**Francisco José Soler Gil,** es profesor de filosofía en el Departamento de Filosofía, Lógica y Filosofía de la Ciencia de la Universidad de Sevilla.

# El motor estético de la física

## Nociones de belleza como guía de la investigación en física

La idea de belleza y la referencia a conceptos asociados con esta idea constituyen uno de los elementos más constantes en la reflexión de los físicos sobre su propio trabajo, y sobre las pautas orientativas del mismo, desde los tiempos de Copérnico y Kepler hasta nuestros días.

Desde el horror de Copérnico por la fealdad del círculo ecuante usado en el modelo cosmológico ptolemaico hasta los procedimientos estéticos de descarte de hipótesis de trabajo empleados por autores como Dirac o Einstein, pasando por la obsesión de Kepler por el hallazgo de proporciones armónicas en los movimientos planetarios, los ejemplos concretos de la búsqueda de belleza en las ecuaciones (como reflejo o expresión de la belleza del orden natural) son tan numerosos que el factor estético debe ser tomado muy en serio. Pues de otro modo sería imposible entender realmente la historia de la física.



GETTY IMAGES/ANTAGAIN/ISTOCK

Ahora bien, ¿a qué apuntan los físicos cuando afirman que una teoría, un modelo, o unas ecuaciones, son bellas, mientras que otras no lo son?

Uno de los pioneros en el desarrollo de las ideas estéticas de la Edad Moderna, el filósofo irlandés Francis Hutcheson (1694-1746), afirmó que la impresión de belleza se despertaba principalmente ante el hallazgo de la unidad en la variedad. Es decir, ante el descubrimiento de que lo que nos venía pareciendo como un conjunto desligado de fenómenos, de detalles, o de datos, en realidad son manifestaciones de algo unitario. Y este análisis resulta muy iluminador cuando lo aplicamos a las consideraciones estéticas de los físicos. Pues el descubrimiento de grandes unificaciones racionales de cosas que parecían desconectadas es para ellos una de las fuentes más claras de lo que podríamos denominar «belleza de las teorías», o «belleza de las ecuaciones».

Casos especialmente significativos y sencillos de propuestas teóricas que consiguen despertar esta emoción estética asociada con la unidad en la variedad son la teoría de la gravitación de Newton y la teoría electromagnética de Maxwell.

En cuanto a la primera, la impresión de belleza tiene que ver con la sencillez de unas fórmulas que muestran la unidad de dos ámbitos fenoménicos que antes se pensaba que no tenían nada que ver entre sí: el de los movimientos celestes, por un lado, y el de los movimientos de los cuerpos en la superficie de la Tierra por otro. Los movimientos celestes se describían en el siglo XVII por medio de las leyes de Kepler —unas leyes bellísimas también, dicho sea de paso—. Mientras que para los movimientos terrestres (los proyectiles, la caída libre de cuerpos o la caída en un plano inclinado) se empleaban diversas ecuaciones, buena parte de las cuales las había ido descubriendo Galileo. Pero Newton fue el primero en darse cuenta de que en realidad la dinámica celeste y la terrestre son exactamente la misma. De manera que, si uno lanza una piedra con un impulso cada vez mayor (y no tiene en cuenta efectos de rozamiento), llegará un momento en que ese movimiento de caída se convertirá en una órbita como las de los planetas.

Una impresión estética similar causó el descubrimiento de la unidad de los fenómenos magnéticos y eléctricos, aparentemente tan disjuntos, manifestada por las ecuaciones de Maxwell.

Por tanto, los investigadores consideran bellas las descripciones que simplifican (sin pérdida de información) nuestra representación del mundo, y nos permiten reducir los elementos necesarios para comprenderlo. Entendiendo que tales descripciones nos desvelan nuevos aspectos de la hermosa sencillez de la naturaleza. Y entre las formas de simplificar dicha representación del mundo, una especialmente elegante y querida por los físicos es la simetría.

Las ecuaciones de un modelo o de una teoría física pueden ser simétricas en varios sentidos, en función de las operaciones que podamos realizar en ellas sin que se altere nada. Por ejemplo, se habla de simetría temporal si la descripción física no se ve alterada si cambiamos el signo de la variable temporal en las ecuaciones. Hablamos de simetría especular (o espacial) si la alteración del signo de las tres variables espaciales no conlleva diferencia alguna. Y así podemos hablar también de simetría de carga, simetrías rotacionales, simetría esférica, etcétera.

Es claro que la presencia de simetrías simplifica la estructura que las posee. Esto es algo que, sin ir más lejos, ya experimenta cualquier estudiante que se ejercita en calcular soluciones a ecuaciones como la de Schrödinger, o como las ecuaciones de campo de la relatividad general. Y una for-

ma muy intuitiva de comprobarlo consiste también, por ejemplo, en prestar atención a la abundancia de formas simétricas en los seres vivos más simples. Los virus, y los organismos que codifican toda la información relativa a sus propiedades estructurales en cadenas de ADN muy cortas, tienden a poseer formas simples y claramente simétricas, que requieren menos información para ser codificadas.

En cualquier caso, entre los físicos se da un gran consenso por lo que se refiere tanto a la belleza de las simetrías como al puesto central que estas ocupan en la naturaleza. Y algunos, como el nóbel Frank Wilczek, no solo constatan que la búsqueda de simetrías ha desempeñado un papel cada vez más central en su disciplina, y muy en especial a lo largo del siglo xx, sino que profetizan una preponderancia aún mayor de este factor estético en el futuro.

No obstante, aunque resulta innegable que la confianza de los físicos en que la simplicidad y la belleza de la naturaleza se expresa ante todo en forma de simetrías ha contribuido muy significativamente al avance científico, este amor a la simetría conlleva también ciertos aspectos problemáticos. Hay al menos dos que no debemos soslayar.

En primer lugar, hay que tener en cuenta los espejismos a que da lugar la belleza simétrica de ciertos modelos, o de ciertos postulados, que en ocasiones deslumbran a algunos investigadores hasta el punto de conducirlos hasta una vía muerta. Y en segundo lugar, existe el peligro de que el empleo del concepto de simetría como única clave estética pueda terminar resultando demasiado estrecho de cara a captar la belleza del mundo. Y nos empuje hacia una comprensión demasiado pobre del atractivo de la naturaleza.

Por lo que se refiere al primer punto, en la física del siglo xx abundan ejemplos de ideas atractivas basadas en simetrías y que han desviado a los investigadores hacia el desarrollo de modelos erróneos. En el campo de la cosmología física es conocido el caso del llamado *principio cosmológico perfecto*, según el cual, el universo (considerado a gran escala) sería homogéneo e isótropo, tanto en el espacio como en el tiempo.

El principio cosmológico perfecto, de innegable y atractiva simplicidad, fascinó a una serie de astrofísicos, singularmente a Fred Hoyle y sus colaboradores. A pesar de una creciente acumulación de indicios contrarios, centraron cada vez más su actividad intelectual en un esfuerzo por defenderlo, llegando a ocupar finalmente una posición marginal en la investigación cosmológica.

¿Puede estar ocurriendo un bloqueo similar en algunas ramas de la física actual? Esta es la sospecha de algunos físicos teóricos importantes de nuestro tiempo, como Lee Smolin. Y resulta significativo en este sentido el impacto reciente de la obra de Sabine Hosenfelder *Perdidos en las matemáticas* que sostiene justo esa tesis: que los criterios estéticos vigentes en la comunidad de los físicos teóricos son en buena medida responsables de una situación de estancamiento en ramas muy importantes de esta disciplina, como son la física de partículas y la cosmología.

¿Sería necesario modificar de algún modo esos criterios estéticos, de forma que se consideraran en serio hipótesis de trabajo que tal vez pudieran sacarnos de este punto muerto?

La sospecha de que el criterio estético de la simetría, pese a su innegable potencia como guía para el descubrimiento de nuevos aspectos del orden natural, podría ser insuficiente, y estar necesitado de alguna modificación, aumenta si nos detenemos un momento en el segundo aspecto problemático mencionado más arriba. Pues ocurre que en la actual descripción física del mundo encontramos detalles que, si empleamos el concepto de simetría como única clave estética, habría que considerar feos, pero que difícilmente cabe estimar así.

Por ejemplo, el modelo de la gran explosión, como bello modelo físico que es, exhibe simetrías de indudable elegancia. Y concretamente postula que el universo es espacialmente, a gran escala, homogéneo e isótropo, y posee, por tanto, simetría espacial esférica.

En consecuencia, si no hubiera más factores a tener en cuenta a la hora de calcular las propiedades de la radiación cósmica de fondo, esta debería poseer la misma temperatura en todos los puntos del universo. Y de hecho, casi lo hace... pero solo «casi». Ahí está el problema. Ahora bien, ¿se trata realmente de un problema? ¿De verdad sería el universo más perfecto y más bello si no existieran esas desviaciones de simetría que se reflejan en las ligeras irregularidades de la radiación de fondo?

El origen de las mismas son fluctuaciones cuánticas de materia y energía que tuvieron lugar en los primeros estadios de la evolución del universo —esos dados cuánticos, destructores de las simetrías, que tanto deploraba Einstein—. Pero no deberíamos olvidar que el resultado de tales fluctuaciones... somos nosotros mismos y todos los objetos complejos del universo.

Algo tiene que andar mal en nuestro razonamiento estético si el amor a la simetría nos lleva hasta el punto de considerar irregularidades, fluctuaciones y máculas precisamente a los sistemas físicos complejos que constituyen las joyas más espléndidas de nuestro mundo. Y lo mismo puede decirse si consideramos otras ligeras desviaciones de la simetría en nuestra imagen física del mundo (como la que se da entre materia y antimateria).

Desde luego, los enormes éxitos logrados por la física sobre la base de la predilección de la naturaleza por las simetrías, de Copérnico a Weinberg, nos invitan a concluir que ese criterio estético no puede ser falso. Pero tal vez sí podría ser conveniente matizarlo con ayuda de otros conceptos que nos permitieran apreciar, por ejemplo, la belleza de las ligeras desviaciones de la simetría. De manera que se amplíe el margen de modelos teóricos atractivos y dignos de explorar, lo que tal vez redunde en nuevos avances en aquellas ramas de la física que actualmente parecen hallarse un tanto bloqueadas.


**PARA SABER MÁS**

**El mundo como obra de arte: En busca del diseño profundo de la naturaleza.** Frank Wilczek. Crítica, 2016. (Reseña: «La belleza en las leyes físicas», Alberto Ramos Martínez en *IyC*, octubre de 2016.)

**Perdidos en las matemáticas: Cómo la belleza confunde a los físicos.** Sabine Hossenfelder. Ariel, 2019. (Reseña: «¿Han perdido el norte los físicos teóricos?» Adan Sus en *IyC*, junio de 2019.)

**The universe speaks in numbers.** Graham Farmelo. Faber & Faber, 2019. (Reseña: «El alma de la física teórica» Jon Butterworth en *IyC*, junio de 2019.)

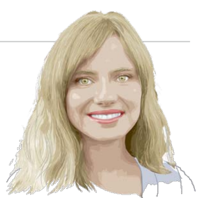
**El enigma del orden natural: Exploraciones en la frontera entre la física y la filosofía.** Francisco José Soler Gil. Senderos, 2020.

**EN NUESTRO ARCHIVO**

**Dirac y la belleza de la física.** R. Corby Hovis y Helge Kragh en *IyC*, julio de 1993.

**La armonía en las leyes de la naturaleza** (entrevista con Frank Wilczek). Manon Bischoff y Robert Gast en *IyC*, septiembre de 2019.

por Aleksandra Cichocka



**Aleksandra Cichocka** enseña psicología política en la Universidad de Kent en Canterbury y es titular de la Universidad Nicolás Copérnico de Toruń.

# Contra las teorías conspirativas

## Es mejor impedir que arraiguen que intentar erradicarlas más tarde

Las teorías conspirativas pueden socavar la participación política, desalentar la protección ambiental y engendrar violencia. Los grupos que se organizan en Internet para propagarlas pueden incitar a la violencia extrema. Además, sus adeptos cumplen menos con las medidas sanitarias. La OMS ha hecho un llamamiento a los países para que pongan coto a las informaciones falsas.

Pero ¿cómo? Una red de más de cien académicos hemos redactado el *Routledge handbook of conspiracy theories*, uno de cuyos capítulos aborda cómo contrarrestar las teorías conspirativas. Su conclusión es que es más fácil difundirlas que refutarlas. Por eso, es mejor impedir que las mentiras arraiguen que intentar erradicarlas luego, para lo cual hay que mirar más allá de su contenido y de las plataformas y algoritmos que las propalan, analizando por qué hay personas inclinadas a creérselas.

Mi trabajo consiste en estudiar los rasgos psicológicos y las razones que afectan a las creencias. Las convicciones ideológicas son fruto del procesamiento voluntario de la información que recibimos y de mecanismos psicológicos automáticos. Nosotros planteamos que las creencias conspirativas se sustentan en tres grandes necesidades psicológicas: la de comprender el mundo, la de sentirse a salvo, y la de pertenecer a un grupo social y estar conforme con uno mismo. Quienes se ponen más a la defensiva son más propensos a aceptar las teorías conspirativas, quizá para eludir sus defectos, y también los que presentan sentimientos de impotencia, ansiedad, aislamiento y alienación. Quienes se ven como piezas miserables de un descomunal engranaje político tienden a sospechar que en él se mueven influencias perversas. Esos miedos pueden ser atizados, además, por los políticos que se sienten amenazados.

La pandemia de COVID-19 reúne las condiciones idóneas para generar vulnerabilidad ante los discursos conspiranoicos: hay mucha incertidumbre y ansiedad; el confinamiento y la distancia social recrudecen el aislamiento; y las personas que intentan entender este momento insólito buscan explicaciones extraordinarias. ¿Remitirá la «infodemia» cuando remita la pandemia? Me temo que no. En primer lugar, quizá se alivien algunas necesidades sociales, pero los sentimientos de duelo, incertidumbre, impotencia y marginación seguirán afligiendo a quienes hayan perdido a un familiar, se hayan quedado en paro o hayan tenido que dejar los estudios. Los planes de recuperación no deben centrarse solo en la economía y la salud física. Si ignoramos la crisis de salud mental, corremos el riesgo de perpetuar la crisis informativa. En segundo lugar, no sabemos casi nada sobre el modo en que evoluciona la vulnerabilidad a las teorías conspirativas. Es posible que hasta las fluctuaciones psicológicas diarias influyan.




También es importante conocer los efectos duraderos de los sucesos vitales o históricos. Un análisis de las cartas de los lectores del *New York Times* y el *Chicago Tribune*, publicado en *American Conspiracy Theories* en 2014, pone de manifiesto picos de contenido conspirativo poco después del fin de la Segunda Guerra Mundial. Con todo, es difícil acometer investigaciones longitudinales en esta materia, sobre la que se ha publicado muy poco. Ahora, al proliferar los estudios sobre la respuesta psicológica a la pandemia, quizá contaremos con más datos para orientar mejor las intervenciones.

Mientras tanto, no debemos abandonar los demás métodos para corregir las informaciones falsas y contener su difusión. Uno de los que funcionan es desmentirlas, aunque resulta muy difícil: hay que explicar por qué algo es mentira, desentrañando las estrategias del engaño y aportando datos verídicos, en vez de limitarse a tachar una información de falsa. Es más eficaz hacerlo de forma preventiva, como una vacuna. Esta técnica, conocida en inglés como *prebunking*, advierte de la posibilidad de que uno se encuentre con informaciones falsas. Hay juegos en línea, como *Bad News* y *Go Viral!*, que muestran cómo se difunden los bulos y consiguen que la gente sea más cuidadosa. Pequeñas acciones como estas sirven para concienciar de la importancia de la veracidad y disuaden de compartir noticias falsas.

Estos efectos pueden reforzarse mediante la atención de las necesidades psicológicas. Las teorías conspirativas serían menos tentadoras y además mejoraría el bienestar. La educación contrarresta las creencias conspirativas porque fomenta el pensamiento crítico y empodera a las personas. Otras intervenciones podrían ir dirigidas a propiciar un sentimiento de identidad común, a fin de favorecer las ideas de pertenencia y significado. Lo ocurrido en Nueva Zelanda es esperanzador. La primera ministra, Jacinda Ardern, puso énfasis en la solidaridad y la transparencia de su gestión, y ofreció a la población una meta clara. Los primeros datos señalan que, a pesar de que aumentó la angustia durante el confinamiento, los neozelandeses no se entregaron más a las ideas conspirativas, sino que aumentó su confianza en la ciencia. Ese es el planteamiento que habría que exportar al resto del mundo. IyC

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 587, pág. 177. Traducido y adaptado con el permiso de Nature Research Group © 2021




GETTY IMAGES/PICT RIDER/ISTOCK

por José Manuel López Nicolás

**José Manuel López Nicolás,** catedrático de bioquímica y biología molecular en la Universidad de Murcia, investiga y escribe sobre nutrición y tecnología de los alimentos.



# Diez suplementos deportivos que no son lo que parecen

## Cuando las pruebas de efectividad brillan por su ausencia

Son muchos los suplementos deportivos que pueden adquirirse en gimnasios y tiendas especializadas. En forma de cápsulas, barritas energéticas o geles, prometen mejorar el rendimiento, prevenir lesiones y hasta reducir la fatiga. Si bien los hay (como los basados en la cafeína o la creatina) que sí han demostrado utilidad, otros levantan muchas dudas sobre su efectividad. Veamos qué dice la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, el máximo organismo europeo en materia de alimentación y encargado de conceder las alegaciones saludables) sobre diez de estos últimos.

**Aminoácidos de cadena ramificada.** La leucina, la isoleucina y la valina son tres aminoácidos esenciales que nuestro organismo no es capaz de sintetizar por sí mismo. Los atletas buscan en ellos una rápida recuperación tras un ejercicio intenso, ya que, supuestamente, aumentan el crecimiento muscular, protegen el sistema inmunitario, disminuyen el dolor muscular e incrementan la masa muscular. Sin embargo, no se ha hallado correlación entre su consumo y dichos efectos.

**L-Carnitina**. Se trata de una amina que es sintetizada en el hígado, los riñones y el cerebro a partir de dos aminoácidos esenciales, la lisina y la metionina. Se piensa que su consumo podría agilizar la recuperación de la fatiga muscular, reparar el tejido muscular esquelético y aumentar la resistencia. Pero los estudios no avalan estas propiedades.

**Hidrolizados de caseína**. La caseína es una fosfoproteína que se halla presente en la leche y en algunos de sus derivados. Sus hidrolizados se postulan como suplementos óptimos para aumentar la rapidez de absorción de aminoácidos y acelerar la síntesis proteica. Sin embargo, no hay pruebas de que ayuden en el crecimiento o mantenimiento de la masa muscular, aumenten la resistencia o aceleren la recuperación de la fatiga muscular.

**Proteína de suero de leche.** Es un producto compuesto principalmente por proteínas globulares de alto valor biológico extraídas del suero de leche. Se comercializa como polvo soluble y se administra en forma de batidos de diferentes sabores. A pesar de su extenso uso, no hay pruebas de la relación causa-efecto entre su consumo y la mejora del rendimiento deportivo o el incremento muscular.

**Beta-alanina.** Aminoácido no esencial sintetizado en el hígado que puede ingerirse a través de la dieta (se halla, por ejemplo, en la carne blanca y la roja). Es uno de los suplementos preferidos de los atletas de fuerza. Sin embargo, no se ha hallado ninguna relación causa-efecto entre su consumo y la mejora del rendimiento físico durante el ejercicio intenso de corta duración.




GETTY IMAGES/IRA_EVVA Y GREENNI/ISTOCK, MODIFICADO POR INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

**L-glutamina**. Aminoácido biosintetizado por el hígado y los pulmones. Se utiliza como suplemento dietético para que los músculos ejercitados no pierdan volumen. Tradicionalmente ha sido empleado por deportistas de musculación para «llenar sus depósitos» (el esfuerzo anaeróbico desgasta las reservas naturales de glutamina en los músculos), pero los estudios no respaldan su efectividad.

**Citrulina malato.** Suplemento formado por la unión de citrulina y ácido málico, dos importantes moléculas que forman parte del ciclo de la urea y del ciclo de Krebs, respectivamente. Aunque sus defensores prometen que mejora el metabolismo del músculo esquelético y la eficiencia contráctil, no hay pruebas de su efectividad.

**Tirosina**. La forma L de este aminoácido no esencial ha sido recomendada para incrementar el rendimiento deportivo. También para tratar el párkinson y el albinismo, entre otros trastornos. Sin embargo, los suplementos compuestos por esta molécula no han mostrado efectos positivos ni en el deporte ni en dichas patologías.

**Ribosa**. Tampoco este famoso monosacárido (componente de moléculas tan importantes como el ácido ribonucleico, nucleótidos y el ATP) se libra de la quema. No hay pruebas de que aumente los niveles de ATP, incremente el rendimiento físico o ayude a una recuperación más rápida tras el ejercicio.

**Hidroximetilbutirato**. Metabolito natural derivado de la leucina. Se dice que estimula la síntesis proteica, acelera la recuperación muscular tras el entrenamiento, reduce el daño muscular y mejora la fuerza y la resistencia cardiorrespiratoria. Sin embargo, no se ha demostrado ninguna de estas supuestas propiedades.

Acabo, no sin antes añadir un comentario. El hecho de que la EFSA no haya encontrado correlación entre la ingesta de estos suplementos y las propiedades que se les atribuyen y, por tanto, no se les permita publicitarlas, no significa que no existan. Solo que, a día de hoy, no hay suficientes pruebas que lo demuestren. Se necesitan, pues, más estudios.



# PLANCTON CÓSMICO

Las galaxias satélite de la Vía Láctea y de otras grandes galaxias vecinas se comportan de una manera muy distinta a como predicen las simulaciones. ¿Falla algo en el modelo cosmológico estándar?

*Oliver Müller*

**LA GALAXIA ENANA DEL ESCULTOR** (*imagen*) es una de las galaxias satélite que orbitan alrededor de la Vía Láctea. Debido a su cercanía, es posible resolver las estrellas individuales que la forman.

**Oliver Müller** investiga en la Universidad de Estrasburgo. Su trabajo se centra en la dinámica de las galaxias enanas y en sus implicaciones para los modelos de materia oscura y las teorías de gravedad modificada.



Si pensáramos en los seres vivos del océano, ¿cuál sería el primero que nos vendría a la cabeza? ¿Quizá las majestuosas ballenas? ¿Los pulpos? ¿O tal vez los delfines o los tiburones? Las posibilidades abundan, pero seguramente jamás pensaríamos en el plancton. No obstante, no hay en el mar seres vivos más numerosos que estos omnipresentes organismos acuáticos. Algo parecido ocurre con el universo. Cuando pensamos en el cosmos, solemos imaginar fascinantes galaxias espirales o gigantescas nebulosas con impresionantes formas y colores. Pero, junto a ellas, existen otras estructuras mucho menos llamativas que, sin embargo, representan la mayor fuente nutritiva del universo: las galaxias enanas. Ajenas a nuestra atención, estas pequeñas agrupaciones estelares son las que sostienen el crecimiento de las estructuras de mayor tamaño.

Para entender cómo interaccionan los distintos objetos que pueblan el cosmos resulta esencial comprender las galaxias enanas. Pero, en los últimos años, se han acumulado varias observaciones inesperadas asociadas a ellas. Es particular, su comportamiento no parece encajar con las predicciones del modelo cosmológico estándar, basado en la existencia de la enigmática materia oscura. Pero vayamos por orden.

En los años treinta del siglo pasado, Harlow Shapley, del Observatorio del Harvard College, realizó un sorprendente descubrimiento. Gracias a uno de los mayores telescopios de la época, situado en Sudáfrica, Shapley encontró un nuevo tipo de galaxias. Para entonces, Edwin Hubble ya había clasificado las galaxias en diferentes tipos. Por un lado estaban las galaxias elípticas, alojadas sobre todos en los cúmulos galácticos, y por otro las espirales, más frecuentes en las regiones solitarias del cosmos. Todas las galaxias se encuentran muy lejos de nosotros, por lo que resulta casi imposible distinguir sus estrellas individuales. Por medio de varias técnicas innovadoras, Shapley encontró un extraño objeto extenso en la constelación austral del Escultor. Aunque presentaba las características de una galaxia, era posible distinguir las estrellas que lo formaban. Tenía que hallarse, por tanto, muy cerca de nosotros. Al igual que una luna y un planeta, debía tratarse de una especie de «satélite» en órbita alrededor de la Vía Láctea. Esta analogía cuadraba además con su tamaño: mientras que la luminosidad de aquel nuevo objeto era equivalente a la de unos pocos millones de soles, la Vía Láctea brilla con el fulgor de unos 200.000 millones.

El objeto descubierto por Shapley se conoce hoy como galaxia enana del Escultor y representa el arquetipo de este tipo de estructuras. Al contener un número relativamente pequeño de estrellas, estas galaxias presentan un aspecto difuso y se observan como manchas celestes que pueden pasar inadvertidas con facilidad. Son por tanto complicadas de encontrar, pero resultan de enorme interés para los cosmólogos. Y aunque escasas en estrellas, son ricas en otra componente: la misteriosa materia oscura. Ningún otro tipo de galaxia contiene materia oscura en una proporción tan elevada como las galaxias enanas. Y precisamente por tener pocas estrellas, son comparativamente fáciles de investigar. Ello las convierte en excelentes «laboratorios» para estudiar la materia oscura.

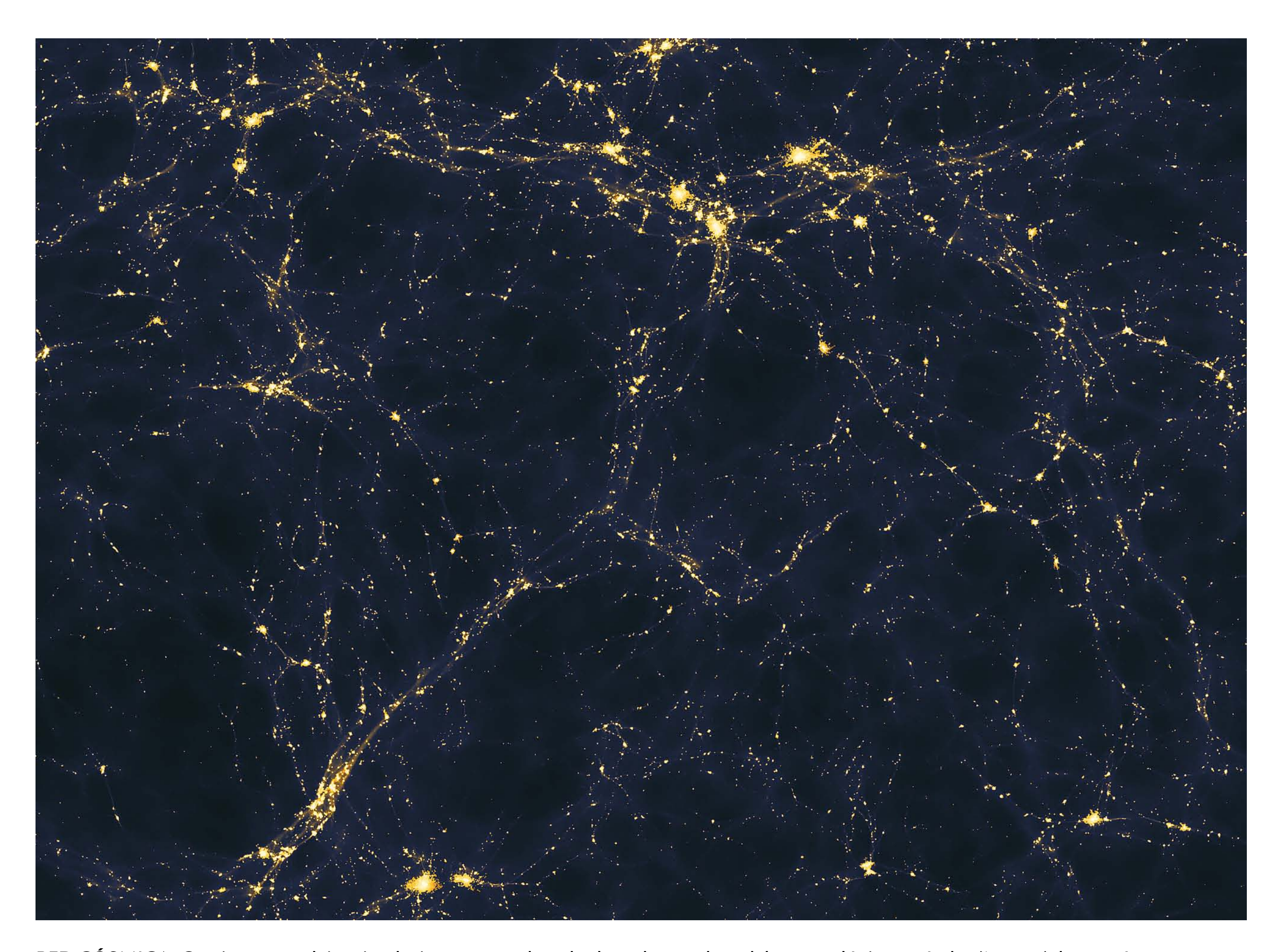
A comienzos del presente siglo, el modelo cosmológico estándar había adquirido ya su forma actual. Este se basa en la teoría general de la relatividad de Einstein y, además de la materia visible, postula la existencia de materia y energía oscuras. Esta última es una componente de naturaleza desconocida causante de la expansión acelerada del universo. Gracias a las simulaciones con superordenadores, los astrónomos pueden

## EN SÍNTESIS

**Las grandes galaxias,** como la Vía Láctea, se encuentran rodeadas por multitud de pequeñas galaxias satélite. Aunque poseen muy pocas estrellas, estas estructuras exhiben una proporción muy elevada de materia oscura.

**Las galaxias enanas** desempeñan un papel importante en la formación y evolución de las galaxias mayores. Sin embargo, su distribución y comportamiento no coinciden con el que predicen las simulaciones cosmológicas.

**Aunque esta discrepancia** se conoce desde hace tiempo, varias observaciones recientes la han exacerbado. ¿Son los casos estudiados hasta ahora una excepción? ¿Falla algo en las simulaciones? ¿O hay un problema en el modelo cosmológico estándar?



RED CÓSMICA: Gracias a complejas simulaciones por ordenador basadas en el modelo cosmológico estándar (*imagen*), los astrónomos pueden reconstruir la historia del universo desde sus comienzos hasta nuestros días. Tales cálculos muestran que, a grandes escalas, la materia visible y la oscura se distribuyen a lo largo de una vasta red de filamentos interconectados. Las grandes galaxias, como la Vía Láctea, se localizan en los nodos de dicha red.



hacerse una idea de cómo evolucionó el universo desde la gran explosión hasta nuestros días. Las primeras estructuras en formarse fueron aquellas de poco tamaño; es decir, las galaxias enanas. Con el tiempo, estas fueron juntándose para dar lugar a otras mayores. El resultado fueron las galaxias como la nuestra. Y al igual que una ballena se nutre de plancton, la Vía Láctea incorporó en su seno innumerables galaxias enanas hasta alcanzar su tamaño actual. Las simulaciones numéricas dejan claro, pues, que las galaxias enanas constituyen los ladrillos con los que se construyen las galaxias más complejas. Es aquí donde aparecen los problemas.

## PREDICCIONES PROBLEMÁTICAS

Según las simulaciones, las grandes galaxias no fueron muy sistemáticas en su alimentación. Se dejaron sin engullir cientos de galaxias enanas que debían pulular a su alrededor. Esta es una predicción de los modelos numéricos y, por tanto, del modelo cosmológico estándar en el que se basan.

Pero, ¿qué aspecto presentan en realidad las inmediaciones de la Vía Láctea? El mismo año de su primer descubrimiento, Shapley encontró una segunda galaxia enana en la constelación del Horno. Sin embargo, tuvieron que pasar decenios antes de que se hallaran otras. A finales de los años noventa tan solo se conocían unas diez galaxias enanas en torno a la Vía Láctea: un número sorprendentemente bajo si lo comparamos con las más de mil que predicen los cálculos.

Aunque este «problema de los satélites ausentes» se convirtió en un importante misterio de la cosmología moderna, dos decenios después los astrónomos lo consideran casi resuelto. Una razón se debe a que, en los últimos años, el número de galaxias enanas halladas en torno a la Vía Láctea se ha multiplicado: hoy ya conocemos unas cincuenta. Además, el aumento en la potencia de cálculo permite efectuar predicciones más precisas sobre la escala de las galaxias enanas, así como incorporar en las simulaciones otros fenómenos importantes. Por ejemplo, si incluimos el efecto de las supernovas, vemos que la energía liberada en estas explosiones estelares puede llegar a disipar una galaxia enana. Así habría ocurrido sobre todo con las galaxias enanas más tenues, que, según los modelos, serían también las más abundantes. Así pues, el aumento del número de galaxias enanas descubiertas alrededor de la Vía Láctea, sumado a la disminución del número de ellas predicho por los modelos, pareció resolver el problema de los satélites ausentes.

No obstante, algunos problemas siguen persistiendo. En 2005, un grupo de la Universidad de Bonn dirigido por Pavel Kroupa estudió la distribución espacial de las galaxias enanas

y concluyó que las simulaciones numéricas no reproducían las observaciones. Desde los años setenta sabemos que las galaxias enanas de la Vía Láctea se sitúan en un fino disco perpendicular al plano de galaxia; una imagen que ha sido confirmada por las observaciones posteriores. En cambio, Kroupa y su equipo hallaron que las galaxias enanas deberían distribuirse de manera aleatoria en torno a la galaxia principal. Según las simulaciones, una estructura discoidal solo aparecería en un 0,5 por ciento de los casos. La Vía Láctea constituiría por tanto un caso atípico, aunque no imposible. Si, por ejemplo, analizásemos mil galaxias, esperaríamos encontrar unas cinco cuyos satélites se distribuyeran en forma de disco.

¿Qué ocurre entonces con las grandes galaxias próximas a la nuestra? Tras la investigación de Kroupa y sus colaboradores, Andreas Koch y Eva Grebel, hoy ambos en la Universidad de Heidelberg, se propusieron responder a esta pregunta. Para ello, estudiaron la vecina galaxia de Andrómeda, una gran galaxia espiral similar a la Vía Láctea. Y lo que hallaron fue sorprendente: también en Andrómeda, las galaxias enanas se agrupan en forma de un fino disco. El segundo caso atípico según las predicciones del modelo estándar.

A esto se añadió poco después otro hallazgo más. A través de mediciones más precisas del movimiento de las estrellas de las galaxias enanas existentes en torno a la Vía Láctea, el grupo de Kroupa estableció que la mayoría de tales galaxias orbitaban en el plano del disco y que lo hacían en un mismo sentido, como los planetas alrededor del Sol. Esta danza coordinada resulta sorprendente, ya que las simulaciones predicen que las órbitas de los satélites deberían distribuirse de forma más bien caótica, y en ningún modo mostrar la regularidad observada. Esta contradicción se conoce como «problema del plano de los satélites».

### AUTOPISTAS CÓSMICAS

¿Por qué predicen los modelos sistemas de satélites con órbitas aleatorias? Responder a esta pregunta nos lleva a los momentos posteriores a la gran explosión, cuando el universo era extremadamente homogéneo. Esto último significa que solo había pequeñas fluctuaciones en la distribución de energía y materia, que, sin embargo, bastaron para que la gravedad fuera concentrando con el tiempo más materia en las regiones más densas. A la vez que eso ocurría, las zonas con menos densidad fueron perdiendo aún más materia, hasta convertirse en grandes vacíos



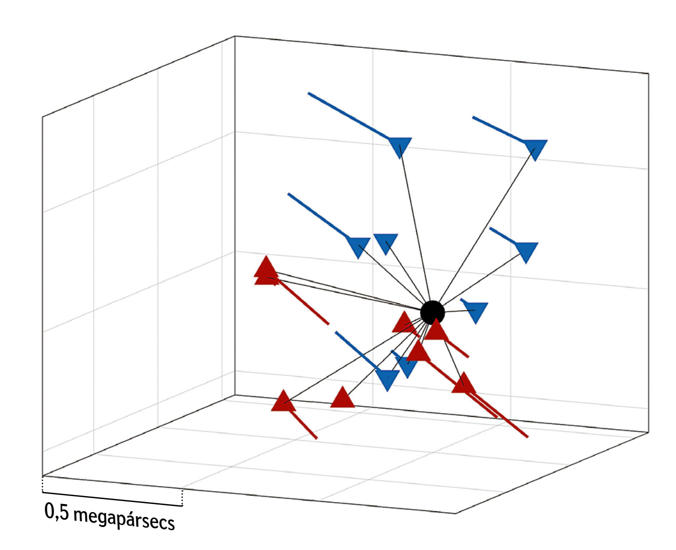
**DINÁMICA ANÓMALA:** Centauro A (*imagen*) es una gran galaxia situada a unos 13 millones de años luz de distancia. Varias observaciones efectuadas durante los últimos años han revelado que, al igual que ocurre en la Vía Láctea y en Andrómeda, sus galaxias satélite no presentan la distribución ni los movimientos que cabría esperar a partir de las predicciones del modelo cosmológico estándar.

OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL (ESO) (*mosaico*); ESO/CÁMARA DE GRAN ANGULAR (WFI) (*óptico*); INSTITUTO MAX PLANCK DE RADIOASTRONOMÍA/ESO/EXPERIMENTO EXPLORADOR DE ATACAMA (APEX)/A. WEISS ET AL. (*submilimétrico*); NASA/OBSERVATORIO CHANDRA (CXC)/CENTRO SMITHSONIANO DE ASTROFÍSICA DE HARVARD/R. KRAFT ET AL. (*rayos X*)

cósmicos. Con el paso del tiempo, en el universo se generó una red filamentosa de materia con inmensos espacios vacíos en medio. Las galaxias de gran masa, como la Vía Láctea, se localizan en los nodos de dicha red. Debido a su intensa gravedad, estas estructuras fueron atrayendo las galaxias enanas situadas a lo largo de los filamentos. Y como las grandes galaxias están conectadas a múltiples filamentos que se extienden en direcciones dispares, ni la distribución de galaxias enanas ni sus respectivas órbitas deberían mostrar ninguna dirección preferente.

Con todo, podría ocurrir que existiesen ciertas configuraciones geométricas de los filamentos que favorecieran la formación de estructuras planas alrededor de las galaxias espirales. De hecho, poco después del hallazgo de Kroupa y sus colaboradores, tales configuraciones aplanadas comenzaron a aparecer en las simulaciones. El problema reside en que estas son considerablemente mayores que la que observamos en la Vía Láctea. Mientras que el plano que forman las galaxias satélite de la Vía Láctea presenta un grosor de unos 65.000 años luz, la sección de los filamentos es al menos de 650.000 años luz; es decir, unas diez veces más. Semejante diferencia es algo tan extraño como si, en una autopista de diez carriles, todos los coches circularan por uno solo. Para dar cuenta de una estructura tan comprimida, las galaxias enanas tendrían que formarse únicamente a lo largo de la región central del filamento. Sin embargo, no conocemos ninguna razón física para que esto deba ser así.

En 2013, un equipo del Observatorio de Estrasburgo dirigido por Rodrigo Ibata estudió el movimiento de las galaxias enanas en torno a Andrómeda. Debido a la lejanía de estos objetos, no resulta posible resolver su desplazamiento usando telescopios. Pero la longitud de onda de la luz que emiten cambia de manera apreciable debido a su movimiento a lo largo de la línea de visión, donde las diferencias plasmadas en el espectro dependen de la velocidad con que el objeto se acerca o se aleja de nosotros (el célebre efecto Doppler). Por fortuna, el disco que forman las galaxias enanas de Andrómeda se observa de canto desde nuestra posición. Eso significa que, si estos objetos orbitan en ese plano, los que están a un lado exhibirán espectros desplazados hacia el rojo, mientras que los que se encuentran en el lado opuesto se mostrarán más azulados. Precisamente eso fue lo que hallaron los investigadores: también en Andrómeda, las galaxias enanas se hallaban contenidas en un disco estrecho y orbitaban en un mismo sentido.




**ÓRBITAS DEMASIADO ORDENADAS:** Las 16 galaxias satélite de Centauro A (*punto negro*) estudiadas por el autor se hallan contenidas en un plano y orbitan esencialmente en un mismo sentido. Las galaxias situadas en uno de los lados del plano (*triángulos rojos*) muestran un espectro desplazado hacia el rojo, lo que indica que se alejan de nosotros (*la longitud de las líneas es proporcional a la velocidad de cada galaxia*). En cambio, las galaxias ubicadas en el lado opuesto (*triángulos azules*) presentan un espectro más azulado, por lo que se acercan.

OLIVER MÜLLER

### UNA TERCERA ANOMALÍA

Fue por entonces cuando comencé mi doctorado en la Universidad de Basilea. Junto a mis directores de tesis, Bruno Binggeli y Helmut Jerjen, este último de la Universidad Nacional de Australia en Canberra, nos planteamos si el Grupo Local (la colección de galaxias que engloba a la Vía Láctea, Andrómeda y sus satélites) podía ser una excepción en lo referente a las predicciones del modelo estándar, o si, por el contrario, había otros grupos de galaxias que mostraban las mismas anomalías.

Para abordar el problema, nos aprestamos a buscar galaxias enanas en otros lugares. Comenzamos con el grupo de Centauro, en el hemisferio sur celeste, para lo cual usamos uno de los instrumentos del telescopio Víctor M. Blanco, uno de los mejores del mundo, en Chile. Al igual que nuestro Grupo Local, el conjunto de Centauro consta de dos grandes galaxias: Centauro A, una galaxia elíptica, y Messier 83, una espiral similar a la Vía Láctea. Junto a ellas hay, además, varias galaxias enanas. En una campaña de observación realizada entre 2014 y 2015 estudiamos más de 500 grados cuadrados de cielo (el equivalente a unas 2000 veces el tamaño de la luna llena) para abarcar así todo el grupo de Centauro. Como resultado, conseguimos duplicar el número de galaxias enanas conocidas en él.

Al mismo tiempo, un equipo dirigido por Brent Tully, del Instituto de Astronomía de Hawái, que estudiaba las galaxias ya conocidas en torno a Centauro A, determinó que estas no presentaban una distribución esférica, sino que también formaban un disco. Lo mismo pudimos comprobar nosotros en el caso de las nuevas galaxias enanas que habíamos descubierto. Tras incluirlas, quedó claro que el sistema de satélites alrededor de Centauro A mostraba una estructura relativamente plana, aunque no tanto como el caso de la Vía Láctea. Sin embargo, esto no era extraño, ya que Centauro A posee una masa mucho mayor y, por tanto, cabía esperar estructuras de mayor tamaño.

Cuando estudiamos su configuración tridimensional, notamos algo importante. Al igual que en el caso de Andrómeda, el plano que forman las galaxias enanas de Centauro se nos muestra de canto. Eso significaba que podíamos analizar si la luz de las galaxias enanas estaba desplazada hacia el azul en un lado y al rojo en otro, y determinar de esta manera si, también en Centauro A, los satélites orbitaban en una misma dirección. Al buscar en la bibliografía existente, encontramos medidas de la velocidad de 16 de las galaxias enanas conocidas alrededor de Centauro A. Al comparar estos valores con las posiciones de los objetos, nos quedamos sorprendidos: 14 de los 16 satélites se movían como cabría esperar de un sistema en rotación. De modo que, también en este tercer caso, las galaxias enanas seguían sin comportarse conforme a las predicciones del modelo cosmológico estándar.

Marcel Pawlowski, actualmente en el Instituto Leibniz de Astrofísica de Potsdam, comparó las observaciones en torno a Centauro A con las mejores simulaciones cosmológicas del momento. Halló las mismas probabilidades que para la Vía Láctea:

la configuración observada ocurriría en aproximadamente un 0,5 por ciento de los casos. Eso implicaba que, para encontrar los sistemas de la Vía Láctea, Andrómeda y Centauro A justo uno detrás de otro, tendríamos que haber observado más de un millón de grupos de galaxias. ¿Se trata de un caso extraordinariamente improbable, o esconden todos estos resultados algo más?

### SIN PISTAS CLARAS

Hoy en día existe un acalorado debate acerca de si todas estas estructuras de satélites en rotación ponen en serios aprietos al modelo cosmológico estándar o si, por el contrario, no estamos más que sobreestimando la importancia de las galaxias enanas. Para Noam Liebeskind, del Instituto Leibniz de Astronomía en Potsdam, no se trata de nada más que de una peculiaridad de nuestro entorno galáctico. Las tres galaxias estudiadas se encuentran en el borde de un gran vacío de la red cósmica y se hallan más o menos alineadas con él. La expansión del vacío podría favorecer estructuras planas, al igual que la superficie elástica de un globo se hace más fina a medida que lo inflamos. Este efecto se vería aumentado por la presencia del cúmulo de Virgo, muy masivo y cuya gravedad tira de esos planos desde sus respectivos bordes. Con todo, la manera en que dicho tirón gravitacional produce y mantiene la rotación sigue sin resolverse. Para Kroupa, sin embargo, la situación es clara: las simulaciones predicen resultados que no se ven confirmados por las observaciones, por lo que las hipótesis relativas a la materia oscura en las que se basa la cosmología estándar han de ser incorrectas.

**En los últimos decenios algo ha quedado claro: si deseamos desentrañar los misterios de la materia oscura, tendremos que entender el insólito comportamiento de las galaxias enanas**

A diferencia de lo que ocurrió con el problema de los satélites ausentes, las mejoras en las simulaciones no han resuelto, al menos por ahora, el problema del plano de los satélites. Más bien al contrario: la probabilidad de observar tales estructuras planas y en rotación se torna cada vez menor. Con todo, es cierto que el mismo modelo describe con gran acierto muchos otros fenómenos, y que no podemos tirar toda la cosmología por la ventana por una discrepancia.

¿Cómo deberíamos proceder ahora? En una campaña de observación realizada junto con Marina Rejkuba, Michael Hilker y Katja Fahrion desde el Telescopio Muy Grande (VLT), también en Chile, hemos descubierto más galaxias enanas en torno a Centauro A. Queremos comprobar si estos nuevos ejemplares rotan también en el mismo sentido que sus compañeras. Por su parte, otros investigadores están asimismo buscando galaxias enanas en torno a otras grandes galaxias, y algunos ya han encontrado indicios de estructuras planas. Mejorar las medidas tridimensionales de tales distribuciones nos permitirá entender mejor estos sistemas en rotación. Además, nos gustaría saber si dichas observaciones pueden reconciliarse de alguna manera con el modelo cosmológico estándar. Por ejemplo, tal vez las estructuras detectadas se hayan generado a partir de grandes colisiones entre galaxias, ya que sabemos que al menos Centauro A ha experimentado un suceso de este tipo en el pasado. Más allá de esta posibilidad, estamos explorando las consecuencias de modificar algunas de las propiedades atribuidas a la materia oscura o incluso a la propia teoría de la gravedad. Las teorías de gravedad modificada se encuentran aún en un estadio muy temprano de desarrollo y no pueden competir con los numerosos éxitos del modelo cosmológico estándar.

Sea como fuere, en los últimos decenios algo ha quedado claro: si deseamos desentrañar los misterios de la materia oscura, tendremos que entender el insólito comportamiento de las galaxias enanas. Por ahora no hemos hecho más que arrojar una tenue luz sobre la oscuridad que envuelve a las estructuras más pequeñas del universo. IyC




PARA SABER MÁS

The great disk of Milky Way satellites and cosmological substructures. Pavel Kroupa et al. en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 431, págs. 517-521, febrero de 2005.
Two planes of satellites in the Centaurus A group. R. Brent Tully et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 802, art. L25, abril de 2015.
Planes of satellite galaxies and the cosmic web. Noam I. Libeskind et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 452, págs. 1052–1059, septiembre de 2015.
A whirling plane of satellite galaxies around Centaurus A challenges cold dark matter cosmology. Oiver Müller et al. en *Science*, vol. 359, págs. 534-537, febrero de 2018.
The planes of satellite galaxies problem, suggested solutions, and open questions. Marcel S. Pawlowski en *Modern Physics Letters A*, vol. 33, art. 1830004, febrero de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Galaxias enanas y materia oscura. Pavel Kroupa y Marcel Pawlowski en *IyC*, marzo de 2011.
Galaxias enanas en la red cósmica. Noam Liebeskind en *IyC*, mayo de 2014.
¿Es real la materia oscura? Sabine Hossenfelder y Stacy S. McGaugh en *IyC*, octubre de 2018.




**VÍCTIMAS DE LA PESTE NEGRA** enterradas en un cementerio utilizado entre 1348 y 1350. La peste fue causada por la bacteria *Yersinia pestis*.

ARQUEOLOGÍA

# LAS EPIDEMIAS QUE MOLDEARON EL MUNDO

El ADN de bacterias y virus hallado en restos humanos antiguos muestra cómo los patógenos ayudaron a derrumbar imperios y a transformar civilizaciones

*James P. Close*

EN EL AÑO 541, DESPUÉS DE VARIOS AÑOS DE CAMPAÑAS CONTRA los godos y los vándalos, el emperador Justiniano I consolidó el Imperio romano de Oriente, que ocupaba una superficie inmensa y casi rodeaba el mar Mediterráneo. Sin embargo, ese año no tuvo tiempo para celebraciones. En lugar de ello, tuvo que hacer frente a un nuevo enemigo mortal, invisible y desconocido.

Una misteriosa enfermedad se propagó por todo el imperio de Justiniano y llegó a su capital, Constantinopla. Las víctimas tenían fiebres altas, sus axilas e ingles se inflamaban causando dolor, y muchas de ellas deliraban. El mismo emperador cayó enfermo. Por toda la ciudad circulaban rumores sobre su muerte. El historiador Procopio, uno de los residentes de la ciudad, afirmó que algunos días llegaron a morir hasta 10.000 personas. Justiniano logró sobrevivir, pero su imperio quedó dañado durante años, perdió numerosos territorios y tuvo que luchar para mantener el dominio de Roma.

Desde hace tiempo, los científicos han intentado averiguar cuál era la identidad de ese enemigo. Algunos pensaban que se trataba de una cepa especialmente letal de la bacteria *Yersinia pestis* —los síntomas se parecían mucho a los de la Peste Negra medieval, de la que dicha bacteria fue responsable—, mientras que otros achacaban la culpa a un virus de la gripe relacionado con el que causó la famosa epidemia de 1918, que mató a entre 50 y 100 millones de personas. Los historiadores también han querido averiguar el lugar donde se originó la peste negra, o bubónica. Muchos señalan a Egipto porque los relatos históricos muestran que allí se produjo una enfermedad parecida justo antes de la catástrofe sufrida por Justiniano.


EN SÍNTESIS

**Desde hace tiempo** biólogos y arqueólogos intentan relacionar la identidad y el origen de los patógenos con las grandes epidemias históricas, como las de la peste negra o bubónica.

**La capacidad** de extraer y analizar el ADN microbiano de restos humanos antiguos, gracias a dos avances recientes, está ayudando a resolver numerosas incógnitas de dichos episodios.

**El ADN antiguo** revela las condiciones en las que los virus y las bacterias provocaban epidemias y el modo en que estas han moldeado la historia.


GETTY IMAGES

**James P. Close** es divulgador científico, con una amplia experiencia en el campo de la investigación biomédica.



Se ha recuperado ADN de *Y. pestis* en tumbas de Escandinavia que datan del Neolítico tardío-Edad de Bronce Antigua

EDAD DEL COBRE

5000 a.C. 4000 a.C. 3000 a.C.

EDAD NEOLÍTICA

Una hipótesis sitúa el origen en la Ucrania actual

Se ha hallado ADN de *Y. pestis* en personas de la Europa neolítica. La enfermedad que causa esta bacteria pudo debilitar a los agricultores europeos, que fueron asimilados por los pueblos de la estepa euroasiática.

Posible transporte de cepas desde la estepa euroasiática hasta Europa

Ahora, biólogos y arqueólogos han aunado esfuerzos para recuperar ADN antiguo de dientes y huesos de esa época, y de esa forma han podido cerrar este debate que llevaba tanto tiempo abierto. Los dientes contenían ADN de *Y. pestis*, y no del virus de la gripe. Siguiendo el rastro de esta cepa en el tiempo y por todo el mundo, los investigadores han descubierto que la peste negra no empezó en Egipto, sino en el oeste de China, y viajó a lo largo de las altas praderas de la estepa euroasiática antes de golpear a Europa.

La enfermedad «evolucionó durante un tiempo antes de ser detectada en el Imperio romano», explica Alexander Herbig, del Instituto Max Planck para la Ciencia de la Historia Humana, en Jena, quien ha utilizado ordenadores para reconstruir los cambios producidos en el ADN del patógeno mientras se propagaba de un lugar a otro. Con el paso del tiempo, algunos de estos cambios le permitieron vivir y multiplicarse en nuevas clases de hospedadores, ampliando así el alcance de su devastación.

La capacidad de extraer el ADN de los microorganismos causantes de enfermedades a partir de restos humanos antiguos está ayudando a rellenar numerosos vacíos de conocimiento en los libros de historia. Las moléculas muestran cómo nuestra historia ha sido moldeada por los encuentros que hemos tenido con bacterias y virus que acabaron convirtiéndose en pandemias. Además de los sucesos que sacudieron la época de Justiniano, los científicos han utilizado ADN del patógeno para mejorar nuestra comprensión de los orígenes de la Peste Negra y de la caída del Imperio azteca. Incluso han hallado pruebas de que una enfermedad en la Edad del Bronce propició que una oleada humana saliera de Asia y llegara a Europa, y esas personas trajeron consigo tecnología, cultura y genes cuya influencia todavía puede percibirse hoy.

Gracias a esos descubrimientos, se han observado unas pautas en las que los microbios provocan epidemias. Estos tienden a propagar la muerte cuando se encuentran con grupos de individuos que viven muy juntos. Se dispersan por poblaciones que nunca habían estado expuestas con anterioridad a ellos y que, por tanto, tienen niveles bajos de inmunidad natural. El aumento del comercio internacional y de la movilidad humana amplifica la propagación, y los patógenos han hallado mayor vulnerabilidad en las personas pobres y marginadas, que tienen menos recursos para protegerse. En la pandemia actual, producida por el nuevo coronavirus SARS-CoV-2, hemos visto de nuevo estas pautas.

## PISTAS MOLECULARES

Hace tiempo que los científicos y los historiadores están interesados en conectar la biología de los patógenos con la historia, pero hasta hace una década los intentos se vieron frustrados por las dificultades con las que se topaban a la hora de analizar el ADN procedente de restos antiguos. Los esfuerzos por recuperar genomas de patógenos en los cementerios con víctimas de la Peste Negra, por ejemplo, «fracasaban una y otra vez», se lamenta Hendrik Poinar, biólogo especializado en ADN antiguo de la Universidad McMaster, en Ontario. Los huesos enterrados se degradaban y solo contenían pequeñas cantidades de moléculas genéticas pertenecientes a los microbios.

Durante la pasada década, dos avances cambiaron el panorama. Uno fue que los especialistas en genómica arqueológica se dieron cuenta de que estaban examinando las partes erróneas del esqueleto. Los dientes, y no los huesos, son las mejores cápsulas del tiempo. En su parte exterior, se hallan protegidos por una dura capa de esmalte. En su interior, la pulpa dental está llena de sangre desecada, la cual contiene restos degradados de patógenos sanguíneos. Los científicos pueden extraer el contenido de ese interior con un taladro dental, disolverlo y, con un poco de suerte, obtener algunos restos de ADN microbiano.

Pero esas muestras están mezcladas y fragmentadas. Es necesario volverlas a unir para así disponer de secuencias largas y detalladas de ADN que puedan atribuirse a alguna bacteria o virus concreto. El segundo gran avance fue la secuenciación de nueva generación, un método que acelera esta reconstrucción. La técnica pasó a utilizarse de forma generalizada gracias al aumento de potencia de los ordenadores, y «modificó por completo las reglas del juego», explica Poinar. En esencia, el

# Los orígenes de cuatro pandemias

**La historia humana** está llena de enfermedades mortales que se han extendido por todo el planeta, pero no ha sido fácil determinar la identidad de los microbios causantes. Ahora, el ADN microbiano antiguo extraído de restos humanos ha demostrado que la bacteria *Yersinia pestis* fue la responsable de cuatro de estas catástrofes. El ADN también indica que la bacteria *Salmonella* fue la que provocó las epidemias de *cocoliztli* que asolaron el Imperio azteca.

Plaga de Justiniano. 541-750

Peste Negra. 1346-1772

Epidemia más reciente de *Y. pestis*. Décadas de 1890-1950

Epidemia de *cocoliztli*, en el Imperio azteca. Hacia 1545

Epidemias modernas: tuberculosis, gripe de 1918, VIH, ébola, SARS, COVID. Siglos XX-XXI

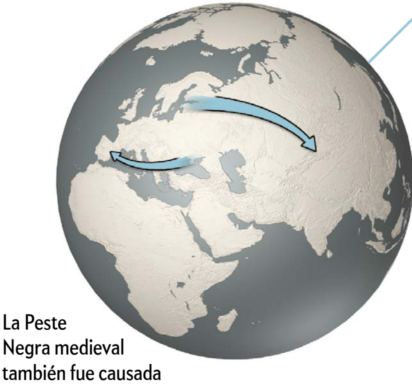
EDAD DEL HIERRO · IMPERIO ROMANO · IMPERIO BIZANTINO

1000 a.C. · 0 · 1000 · 2000

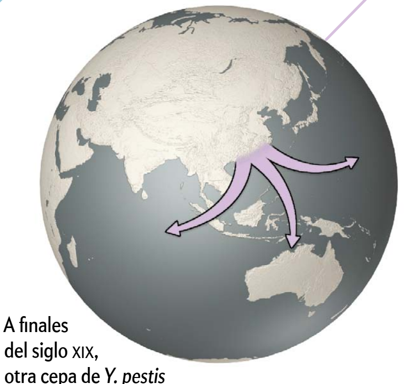
EDAD DEL BRONCE · ANTIGÜEDAD CLÁSICA Y TARDÍA · PERÍODO MEDIEVAL

Colonización europea de las Américas

El emperador Justiniano I y su Imperio romano de Oriente fueron golpeados por otra cepa de *Y. pestis*. El ADN antiguo recuperado muestra que este patógeno se trasladó desde Asia, provocando que el imperio perdiera mucho terreno.



La Peste Negra medieval también fue causada por *Y. pestis*, según el ADN recuperado de dientes y huesos en cementerios de la época. Es muy posible que esta cepa circulara por toda Europa, Oriente Medio y Asia. Murieron millones de personas.



A finales del siglo XIX, otra cepa de *Y. pestis* se propagó por los continentes. Los datos de ADN trazan su recorrido desde el interior de China hasta Hong Kong, y luego hasta Japón, India, Sudamérica, Estados Unidos y Europa. Los brotes se detuvieron durante la década de 1950.

FUENTES: «ANCIENT PATHOGEN GENOMICS AS AN EMERGING TOOL FOR INFECTIOUS DISEASE RESEARCH», DE MARIA A. SPYROU ET AL. EN *NATURE REVIEW GENETICS*, VOL. 20, ABRIL DE 2019; «*YERSINIA PESTIS* AND THE PLAGUE OF JUSTINIAN 541-543 A.D.: A GENOMIC ANALYSIS», DE DAVID M. WAGNER ET AL. EN *LANCET INFECTIOUS DISEASES*, VOL. 14, ABRIL DE 2014; «EMERGENCE AND SPREAD OF BASAL LINEAGES OF *YERSINIA PESTIS* DURING THE NEOLITHIC DECLINE», DE NICOLAS RASCOVAN ET AL. EN *CELL*, VOL. 176, ENERO DE 2019; Y «HISTORICAL *Y. PESTIS* GENOMES REVEAL THE EUROPEAN BLACK DEATH AS THE SOURCE OF ANCIENT AND MODERN PLAGUE PANDEMICS», DE MARIA A. SPYROU ET AL. EN *CELL HOST & MICROBE*, VOL. 19, JUNIO DE 2016.

GEORGE RETSECK (*mapas*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

método consiste en secuenciar numerosas cadenas cortas de ADN al mismo tiempo, en paralelo, las cuales se combinan en un genoma reconocible al conectarlas allí donde las series de letras (las conocidas A, T, C y G del código genético) coinciden. Este enfoque hace posible reconstruir un genoma entero a partir de una muestra degradada, esquivando la necesidad de recuperar un segmento de ADN largo y de gran calidad.

Uno de los primeros éxitos derivados de esos dos avances llegó en 2011. Poinar y sus colaboradores recuperaron un borrador de genoma de *Y. pestis* a partir de dientes hallados en un cementerio londinense donde se habían enterrado víctimas de la Peste Negra. Su hallazgo confirmó, tras décadas de especulación, que este microbio era el responsable de la pandemia medieval que mató, entre 1347 y 1351, al 30 por ciento o más de la población de Europa. Durante los cinco años siguientes, se descubrió que esa cepa no tenía nada que la hiciera especialmente virulenta; se asemejaba bastante a la *Y. pestis* actual, que no es, ni de lejos, igual de mortífera. Al parecer, la enorme mortalidad de la Edad Media fue impulsada por una proliferación incontrolada de ratas negras que diseminaban la bacteria por las poblaciones densas y malnutridas de las crecientes ciudades, cuyas condiciones higiénicas eran terribles.

Puede que la mayor sorpresa fuera que el ADN del microorganismo causante de la peste negra se hallara en cementerios más antiguos. Resulta que ni la pandemia de la época de Justiniano ni la medieval fueron las primeras que alteraban la vida humana a una escala transcontinental.

### UNA PANDEMIA PREHISTÓRICA

En 2015, los datos de 101 genomas de humanos antiguos, extraídos de esqueletos enterrados por toda la estepa euroasiática, determinaron que un pueblo de la Edad del Bronce Antigua, los yamna, salieron de la estepa, hará unos 5000 años, y reemplazaron a las culturas agrícolas neolíticas de Europa. Los recién llegados tenían caballos domesticados, nuevas formas de metalurgia y probablemente eran belicosos. Aun así, el cambio de cultura a gran escala ha desconcertado a los científicos porque los grupos europeos habían prosperado durante siglos. «¿Cómo diablos pudieron entrar en declive estas sociedades neolíticas, bien organizadas y aparentemente prósperas?», se pregunta uno de los arqueólogos que han participado en este estudio, Kristian Kristiansen, de la Universidad de Gotemburgo. Algunas pruebas arqueológicas apuntan a una caída de la población europea más o menos en la época en la que llegaron los yamna. Y Kristiansen explica que tanto él como sus colaboradores empezaron a preguntarse si alguna enfermedad habría debilitado a la sociedad europea lo suficiente como para permitir una incursión. En concreto, se preguntó: «¿Pudo ser la peste negra?».

Cuando el equipo de Kristiansen secuenció 101 genomas de humanos antiguos de la estepa, halló mucho material: no







**EN LOS DIENTES HUMANOS** recuperados de una fosa común de Frälsegården, en Suecia, se ha hallado ADN antiguo del microbio causante de la peste negra, *Yersinia pestis* (*1*). La fosa, de unos 5000 años de antigüedad, contiene los restos de unas 78 personas (*2*).

solo ADN humano, sino una mezcla de virus, bacterias y contaminantes ambientales modernos. «Descartamos entre un 95 y un 99 por ciento de los datos», explicó Simon Rasmussen, de la Universidad de Copenhague, miembro del equipo. «Simplemente, lo desechábamos.» Pero en 2015, la nueva técnica de secuenciación les permitió escudriñar el material y compararlo con otros genomas. «Así que retomamos todos esos datos (100.000 millones de pequeños segmentos de ADN) y buscamos trazas del ADN del microorganismo causante de la peste», explica Rasmussen.

En unas dos semanas, los potentes ordenadores proporcionaron una respuesta. Alrededor del 7 por ciento de los restos antiguos presentaba trazas de ADN del patógeno, que se escondía en el interior de los dientes. Las bacterias se introducen en ellos a través de los vasos sanguíneos, y «si el microbio se hallaba en la sangre, el pronóstico era realmente malo», según Rasmussen. «Las personas tenían muchas probabilidades de morir.» Esta forma más letal de la enfermedad recibe el nombre de peste septicémica; en su forma más común, la peste bubónica, las bacterias infectan los nódulos linfáticos. Dado que una gran parte de las muestras de ADN examinadas no estaban en muy buen estado, Rasmussen también sospecha que el ADN del patógeno pudo estar presente en una proporción mucho mayor del material, aunque estaría demasiado entremezclado para poder ser detectado. Según él, las pruebas «están empezando a apuntar que probablemente se produjo una pandemia». Poinar, sin embargo, es más cauteloso y explica que hay otros factores, aparte de *Y. pestis*, como la hambruna o la guerra, que pudieron haber contribuido al hundimiento de la población europea.

Si la bacteria de la peste fue una de las causas, sus efectos todavía se podrían ver. El equipo de Kristiansen defiende que, al igual que los posteriores brotes de *Y. pestis*, este se propagó desde la estepa hacia Europa. Los yamna podrían tener alguna inmunidad a la bacteria, si habían estado expuestos a ella durante cientos de años. Esa resistencia les habría dado una ventaja sobre los agricultores europeos asolados por la peste. Así que se mudaron. Con un color de piel más claro y un lenguaje protoindoeuropeo, este grupo y su migración siguen influyendo en el aspecto, las lenguas y los genes de la Europa actual. Según Kristiansen, «transformaron el curso de la historia europea y cambiaron las lenguas del continente». Genéticamente, sostiene, los europeos «son descendientes de esos pobladores de la estepa».

Hace poco, el equipo descubrió más pruebas que respaldan esta teoría del cambio impulsado por una peste. Detectó la presencia de *Y. pestis* en dos esqueletos suecos del neolítico de unos cinco milenios de antigüedad. Al parecer, la enfermedad llegó a Escandinavia justo antes de la aparición de los yamna. Kristiansen explica que sus colaboradores están ahora explorando «todos los lugares posibles» en busca de otros ejemplos de esta variedad temprana. La denomina «la madre de todas las pestes».

## UN VIAJE EVOLUTIVO

Ya se han analizado varias docenas de genomas antiguos de *Y. pestis*, recogidos de lugares con antigüedades de hasta 5000 años. Los cambios en sus secuencias han permitido reconstruir la historia evolutiva de la bacteria y señalar algunas alteraciones genómicas tempranas que habrían ayudado a transformar un patógeno intestinal oportunista en uno de los mayores asesinos de la historia humana.

Era muy poco probable que su forma más primitiva, la variedad de hace 5000 años, fuera transportada por pulgas de rata, como ocurrió con la versión de la Peste Negra. A esa bacteria antigua le faltaba una enzima que el patógeno actual utiliza para evitar ser digerido en los intestinos de las pulgas. Posiblemente, se propagó a través de gotitas en el aire cuando su hospedador (una persona o un animal) tosía. Pero, hace unos 4000 años, *Y. pestis* obtuvo un gen llamado *ymt*, tal vez a partir de otro tipo de bacteria intestinal. (Las bacterias intercambian genes con mucha frecuencia.) El gen *ymt* codifica una enzima protectora que posibilita que el organismo causante de la peste viva en el interior de las pulgas y viaje con ellas, explica Johannes Krause, especialista en ADN antiguo del Instituto Max Planck de Ciencia de la Historia Humana.

Tras adquirir el gen *ymt*, *Y. pestis* desarrolló la capacidad de formar una biopelícula, lo que quizá fuera su innovación más siniestra. Aparecieron mutaciones en un gen que mejora la capacidad de producir una matriz extracelular adhesiva, además de otras que entorpecieron el funcionamiento de otros genes que suelen ralentizar o detener la producción de la matriz. Estos cambios permitieron a la bacteria crear conglomerados pegajosos de células. Se formaron en el intestino medio de la pulga,

KARL-GÖRAN SJÖGREN (*1*); TONY AXELSSON (*2*)

lo que obstruyó su aparato digestivo. Las pulgas, hambrientas, entran en un frenesí por alimentarse y pican repetidamente a cualquier mamífero que se cruce en su camino, y con cada mordisco le pasan las bacterias.

### PERSONAS Y PATÓGENOS

La investigación del ADN antiguo ha hecho posible trazar la historia de otros microbios, además de *Y. pestis*, lo que ha permitido identificar las fechas en las que muchos patógenos humanos modernos, entre ellos, cepas de virus de la lepra, la tuberculosis, la hepatitis B y algunos parvovirus, aparecieron y crearon problemas por todo el mundo. Quizá no sorprenda que esas fechas coincidan con las épocas en las que los humanos empezaron a echar raíces, explica Krause.

A medida que la civilización se fue desarrollando, las comunidades distantes se conectaron entre sí gracias a los caballos, la rueda y luego los barcos, y allí donde iban las personas, los microbios las acompañaban. Según Herbig, el comercio de larga distancia facilitó «el intercambio de enfermedades a escala global». Está bien documentado que las distribuciones de los genomas de la hepatitis B y de la peste negra siguen las rutas de migración humanas. Asimismo, la tuberculosis fue portada por «los comerciantes navieros romanos o por los mercaderes que se reunían en lugares de paso a lo largo de la Ruta de la Seda», según Caitlin Pepperell, de la Universidad de Wisconsin-Madison. Su equipo ha utilizado el ADN antiguo de la tuberculosis para calcular que las cepas modernas surgieron hace menos de 6000 años, y no hace más de 70.000 años, como se creía.

No fue solo el comercio el responsable de la propagación de los microbios. A menudo, los patógenos utilizan múltiples hospedadores animales, y los datos del ADN demuestran que, cuando nuestras relaciones con determinados animales se hacen más cercanas, los patógenos hacen su aparición. Una de las últimas poblaciones de ardillas rojas de Reino Unido todavía alberga una cepa medieval de lepra, posiblemente llevada hasta Inglaterra por los comerciantes de pieles vikingos. De forma parecida, una cepa de la tuberculosis que afecta hoy a las personas quizá fuera transportada por las focas hasta Sudamérica, un hecho que ha sido revelado por el ADN microbiano de un esqueleto peruano de mil años de antigüedad. Ese genoma de la tuberculosis guarda un estrecho parentesco con el de las cepas halladas en las focas y los leones marinos actuales. El resultado tiene bastante sentido desde un punto de vista arqueológico y antropológico, ya que esas poblaciones cazaron muchas focas, explica Herbig, que participó en la investigación. «Pintaron cerámicas en las que se pueden ver imágenes de personas cazando focas y procesando su carne.»

Ese conjunto de factores humanos que aumentaron la vulnerabilidad a los patógenos (poblaciones más grandes, una mayor conectividad global y una relación cambiante con el mundo animal) tuvo un gran impacto en el Nuevo Mundo, cuando los europeos llegaron a él por primera vez. El Imperio azteca, centrado en México, fue invadido por un pequeño contingente de fuerzas españolas, a principios del siglo XVI, que derribaron la civilización con la ayuda de sujetos insatisfechos y estados rivales. Los españoles instalaron luego un sistema brutal de encomienda, basado en el maltrato, el trabajo excesivo y la desnutrición. Además, parece que esos forasteros europeos trajeron con ellos otros atacantes.

Después de la conquista inicial, en 1521, la población azteca fue devastada por una de las pandemias más grandes de toda la historia. Los escritos del franciscano español fray Bernardino de Sahagún, quien llegó a México ocho años después del primer contacto, indican que una infección mató hasta el 80 por ciento de la población indígena. Pero la identidad de esta enfermedad, a la que los nativos denominaron *cocoliztli*, seguía siendo un misterio. Se sospechaba de distintos males, como la gripe hemorrágica, la malaria, el tifus o la viruela. Para los historiadores, no estaba claro si su origen fue local o importado por los españoles.

Sin embargo, en 2018, el ADN antiguo señaló a un probable culpable. Después de obtener muestras de esqueletos descubiertos en una fosa común de la época de la *cocoliztli*, Krause y sus colaboradores determinaron que más de la mitad de ellas albergaban *Salmonella paratyphi C.*, bacteria que provoca una grave enfermedad intestinal. No se ha hallado *Salmonella* en las Américas que corresponda a una época anterior a la llegada de los europeos, por lo que es casi seguro que llegó a bordo de los barcos procedentes del Viejo Mundo. Seguramente, los conquistadores transportaron comida y agua contaminada en sus barcos, además de otros posibles vectores, como gallinas, cerdos y ganado, así como ratas y ratones. Todos ellos tenían la capacidad de transmitir la enfermedad.

Justo en ese momento, una desgracia ambiental ayudó a microbios como *Salmonella* a hallar un nuevo hogar. La serie de sequías catastróficas que asolaron México durante el siglo XVI (según revelan los datos de los anillos de los árboles), la escasez de alimentos y el desplazamiento masivo de población contribuyeron a su debilitación. Las personas fueron incapaces de luchar contra los patógenos desconocidos, para los que no estaba preparado su sistema inmunitario. Y se derrumbó su civilización.

Las sociedades actuales saben mucho más sobre patógenos y sobre cómo hacerles frente que las de hace 500 o 5000 años. Pero la lucha actual contra la COVID-19 demuestra que nuestra vulnerabilidad ante enfermedades nuevas no ha cambiado; a menudo saltan a los humanos desde otras especies, se propagan gracias al comercio global y a los viajes, y se ven exacerbadas por el hacinamiento, la pobreza y la desnutrición. La investigación del ADN antiguo nos recuerda esos hechos persistentes y muestra que algunos de los acontecimientos más importantes de la historia no solo fueron definidos por figuras poderosas como el emperador Justiniano I o el conquistador Hernán Cortés. También fueron moldeados profundamente por los microbios que sus imperios ayudaron a propagar. IyC

#### PARA SABER MÁS


*Yersinia pestis* and the Plague of Justinian 541-543 AD: A genomic analysis. David M. Wagner et al. en *Lancet Infectious Diseases*, vol. 14, abril de 2014.

Historical *Y. pestis* genomes reveal the European Black Death as the source of ancient and modern plague pandemics. Maria A. Spyrou et al. en *Cell Host & Microbe*, vol. 19, junio de 2016.

Ancient pathogen genomics as an emerging tool for infectious disease research. Maria A. Spyrou et al. en *Nature Review Genetics*, vol. 20, abril de 2019.

Emergence and spread of basal lineages of *Yersinia pestis* during the Neolithic decline. Nicolás Rascovan et al. en *Cell*, vol. 176, enero de 2019.


#### EN NUESTRO ARCHIVO


La Peste Negra. Colin McEvedy en *IyC*, abril de 1988.

La pandemia de COVID-19 a la luz de la historia de la medicina. María José Báguena Cervellera en *IyC*, junio de 2020.

La conquista agrícola de Europa. Laura Spinney en *IyC*, septiembre de 2020.

ASTRONOMÍA

# Lunas extrasolares

**Ha comenzado la carrera por descubrir la primera luna en torno a un planeta fuera del sistema solar**

*Rebecca Boyle*

***Ilustración de David Palumbo***


D·PALUMBO

**Rebecca Boyle** es periodista científica especializada en física, astronomía, ciencias de la Tierra y cambio climático. Su trabajo ha aparecido en *New Scientist, Aeon, Wired* y *Popular Science*, entre otros medios.



En 1655, el astrónomo holandés Christiaan Huygens montó un telescopio refractor que había construido él mismo y lo orientó hacia Saturno. Pensaba que el planeta estaba rodeado por un único anillo sólido y pretendía observar su inclinación, que, como ya sabían los astrónomos, cambiaba a lo largo de los años. Pero, en vez de eso, descubrió algo inesperado: una luna gigante, que hoy conocemos como Titán. Saturno se convirtió así en el tercer planeta, después de la Tierra y Júpiter, con un satélite conocido. Aunque los anillos eran una característica inusual, las lunas parecían comunes en el sistema solar.

En 2007, una red de telescopios automatizados observó una estrella situada a 433 años luz en la constelación del Centauro. El astro se oscureció de manera apreciable durante al menos 54 días, alcanzando su menor brillo en torno al 29 de abril. En 2012, los astrónomos concluyeron que esa estrella albergaba un enorme planeta gaseoso del tamaño de Saturno y rodeado por un espectacular conjunto de 37 anillos. Y al igual que nuestro Saturno, ese mundo, conocido como J1407b, presentaba un hueco en su sistema de anillos, lo que les llevó a proponer la presencia de una luna tan masiva como la Tierra.

Hasta finales del siglo xx, los únicos planetas conocidos eran los siete mundos que comparten el Sol con la Tierra. La situación comenzó a cambiar a finales de los años noventa, con el hallazgo de los primeros exoplanetas, y dio un vuelco a partir de 2009, cuando empezó a operar el telescopio espacial Kepler. Hoy sabemos que el cosmos se encuentra moteado de planetas, que estos son mucho más numerosos que las estrellas y que los hay de casi todos los tipos y tamaños imaginables. Podría decirse que, por primera vez desde los tiempos de Galileo (el descubridor de las mayores lunas de Júpiter) y de astrónomos como el propio Huygens, los seres humanos estamos contemplando nuestro lugar en el universo desde una nueva perspectiva. Y aunque todavía no hemos encontrado un planeta idéntico al nuestro ni hemos confirmado la existencia de una luna en torno a un exoplaneta, estamos cada vez más cerca de conseguirlo.

Los astrónomos comenzaron a conjeturar sobre exolunas a principios de este siglo. Desde 2018, las búsquedas han comenzado a ofrecer unas cuantas candidatas prometedoras. Confirmar la existencia de una luna más allá del sistema solar volvería a reorientar nuestra perspectiva cósmica. Descubriríamos si los satélites son ubicuos o poco frecuentes; si suelen ser grandes o pequeños en comparación con su planeta; si se forman junto a ellos o en cataclismos posteriores; o si aparecen en grupo o suelen estar aislados. Eso nos ayudaría a entender si nuestro sistema solar es único, y si la Tierra y su solitaria y enorme luna representan una excepción.

«Cada vez que encontramos un exoplaneta lo veo como un reflejo de nuestra propia historia», reflexiona Alex Teachey, investigador del Instituto de Astronomía y Astrofísica de la Academia Sínica de Taiwán y codescubridor de una posible luna en el exoplaneta Kepler-1625b. «¿En qué sentido somos comunes y en cuál no? Como ya ha empezado suceder con los sistemas de exoplanetas exóticos, también las exolunas podrían sorprendernos.»

## LAS VENTAJAS DE TENER LUNA

La Tierra sigue siendo singular, tanto en el sistema solar como en cualquier otro lugar que hayamos avistado hasta ahora. No solo se trata del único planeta donde sabemos que existe vida. Es también el único conocido cuyo interior esculpe la superficie por medio de la tectónica de placas, un proceso que además interviene en la dispersión y evolución de la vida. Tampoco sabemos de otro planeta que posea una atmósfera lo suficientemente densa para sustentar agua líquida, un clima que haya permanecido estable durante milenios, y que se encuentre a la distancia justa de su estrella para mantenerse caliente sin abrasarse. Estas condiciones se deben, al menos en parte, a la Luna.

El papel de la Luna en la historia de nuestro planeta se remonta a sus orígenes, hace unos 4500 millones de años, cuando un cuerpo del tamaño de Marte colisionó con la incipiente Tierra. Aquel cataclismo dejó una Tierra incandescente y oblonga y una Luna en ebullición. Desde entonces, esta no ha dejado de enfriarse y alejarse de nuestro planeta. Este se fue volviendo más esférico a medida que la Luna se apartaba, y la corteza terrestre se deformó bajo las fuerzas de marea resul-

EN SÍNTESIS

**Un factor** que ha contribuido de manera clave en la habitabilidad de la Tierra es la existencia de la Luna. Al mismo tiempo, los satélites de los planetas gigantes podrían ser también mundos aptos para la vida.

**En los últimos años,** varios grupos de todo el mundo se han lanzado a buscar lunas en sistemas extrasolares. Aunque ya se han obtenido algunos resultados prometedores, todavía no se ha confirmado ninguno de ellos.

**La búsqueda de exolunas** se enfrenta a varios desafíos técnicos de primer orden. La situación podría mejorar pronto gracias a nuevos métodos de análisis de datos y a la puesta en marcha de futuros observatorios.



LA LUNA, vista aquí desde la Estación Espacial Internacional, ha determinado la historia de nuestro planeta y ha contribuido a hacerlo habitable.

NASA

tantes, lo que posiblemente puso en marcha la tectónica de placas. El retroceso de la Luna también ralentiza la rotación de la Tierra, lo que alarga nuestros días a un ritmo de unos dos milisegundos por siglo.

La masa de la Luna es considerable en relación con la de la Tierra: nuestro planeta es solo 81 veces más masivo que su satélite, un cociente mucho menor que el correspondiente al resto de las lunas del sistema solar. La masa de Saturno, por ejemplo, es 4200 veces mayor que la de Titán. La atracción de la Luna estabiliza el eje de rotación de la Tierra y lo mantiene con una inclinación casi constante de unos 23,5 grados con respecto a la perpendicular al plano de la órbita terrestre alrededor del Sol. Esta configuración permite que el clima de nuestro planeta permanezca estable durante largos períodos de tiempo. Algo así no ocurre en Marte: al carecer de lunas de tamaño apreciable, la inclinación de su eje puede variar entre 0 y 60 grados cada pocos millones de años, lo que produce drásticos cambios climáticos. Además, la Luna es la principal causante de las mareas de la Tierra, que dan forma al litoral y a la vida de los océanos. Es muy probable que las mareas desempeñaran un papel en la evolución, al guiar a las primeras plantas y tetrápodos desde las marismas saladas de las costas hasta tierra firme.

Así pues, nuestra luna no es un satélite silencioso y fantasmal. Se trata un mundo en sí mismo, uno que los habitantes de la Tierra hemos usado y contemplado desde que los primeros seres dotados de vista la alzaron al firmamento. Sin la Luna, la Tierra no sería la misma Tierra. Y tampoco lo serían los océanos, la poesía, la religión, la ciencia ni ninguno de nosotros.

Si el singular pasado de la Tierra sirve de guía, los exoplanetas carentes de lunas podrían ser muy diferentes: rocas sin vida condenadas a bascular como Marte, heladas o hirvientes, o incapaces de preservar una atmósfera y vida. Y también podría ocurrir que las exolunas, si existen, fuesen lugares más aptos para la vida que sus propios planetas. Quizá la búsqueda de vida más allá del sistema solar debería centrarse en aquellos planetas con posibles lunas, o incluso en estas últimas.

Aunque Huygens no tenía modo de saberlo, Titán, un mundo rodeado por una bruma naranja y salpicado de ríos y lagos de metano y etano, se parece bastante a un planeta. No sería acogedor para nosotros ni para ninguna forma de vida que nos resultara reconocible, pero posee líquido y una atmósfera, lo que supone una oportunidad para que los ingredientes se mezclen y surja la vida. Saturno, con su intensa gravedad y sus nubes de amoníaco, nunca sería un refugio seguro para la vida. Y otro tanto ocurre con Júpiter, una especie de «estrella fallida» con formidables cinturones de radiación y capas de gas que nos resultarían mortíferas. Sin embargo, nada de ello ocurre con sus satélites.

«A partir de lo que vemos en el sistema solar, sabemos que los planetas similares a Júpiter son capaces de albergar lunas bastante grandes donde podría haber agua», explica Chris Fox, estudiante de doctorado en la Universidad Occidental de Ontario. «Si descubrimos un júpiter en la zona habitable de su estrella, tal vez veamos una luna similar a la Tierra y con potencial para albergar vida. Dada la cantidad de lunas que seguramente hay, quizá la vida sea más común en ellas que en los planetas.»

En otras palabras, las exolunas podrían ser habitables y también ayudar a que lo sean sus planetas anfitriones. Encontrarlas nos ayudaría a entender mejor esos mundos, y también el nuestro.

### UNA CANDIDATA INTRIGANTE

Los astrónomos ya sospechaban que el cosmos debía estar repleto de planetas con sus respectivas lunas mucho antes de que el telescopio Kepler viera su primera luz. En 1999, Paola Sartoretti y Jean Schneider, hoy en el Observatorio de París, propusieron por primera vez la búsqueda de exolunas mediante el método del tránsito.

Cuando una estrella y sus planetas están dispuestos en un plano que se ve de canto desde la Tierra (como si miráramos el sistema solar de lado, y no de arriba abajo), la estrella parecerá oscurecerse durante un breve período de tiempo cada vez que un planeta pase por delante de ella. Este paso frontal, similar a un eclipse, se denomina tránsito. Cuando la atenuación del brillo de la estrella se repite de forma regular, cabe inferir que el fenómeno está causado por un planeta en órbita. Este método fue el que usó el telescopio Kepler para descubrir exoplanetas durante un decenio. Sartoretti y Schneider argumentaron que también podría servir para detectar lunas con órbitas amplias, siempre que en el momento del tránsito estas se hallaran a un lado del planeta según se ve desde la Tierra. En tal caso, el brillo de la estrella anfitriona podría atenuarse más de lo habitual, o incluso hacerlo dos veces si la luna se encontrase lo bastante lejos del planeta. Visto desde el planeta durante el tránsito, la luna estaría en cuarto creciente o menguante; una luna llena o nueva (cuando el planeta, el satélite y la estrella están aproximadamente alineados) no dejaría una huella perceptible en el tránsito del planeta.

Sartoretti y Schneider sugirieron que, incluso si las exolunas orbitaran cerca de sus planetas anfitriones, lo que haría improbable una atenuación secundaria, sería posible detectarlas a partir del cambio aparente en la pauta de tránsitos del planeta. En general, los tránsitos suelen repetirse con la precisión de un metrónomo. Pero, en ocasiones, se produce una ligera desviación, y un tránsito comienza o acaba un poco antes o después de lo previsto. Esas variaciones en el tiempo de tránsito pueden deberse a la existencia de otros planetas en órbita y al tirón gravitatorio que unos ejercen sobre otros. Sin embargo, también pueden darse cuando un planeta posee una luna de gran tamaño.

Para entender por qué, conviene aclarar que, aunque solamos decir que la Luna orbita alrededor de la Tierra, en realidad ambos cuerpos lo hacen en torno a su centro de masas común. Este se encuentra situado en el interior de nuestro planeta (en el manto), ya que la Tierra es mucho más masiva que la Luna. Como resultado, nuestro planeta se bambolea muy levemente mientras orbita alrededor del Sol. Ese vaivén es una de las señales que Sartoretti y Schneider propusieron buscar.

En 2017, Teachey y David Kipping, de la Universidad de Columbia, escudriñaron los datos del telescopio Kepler en busca de indicios de una luna que bloquease la luz de su estrella. Y aunque analizaron unos 300 planetas con la esperanza de encontrar toda una población de exolunas, solo hallaron un candidato: Kepler-1625b.

Tras ello, solicitaron tiempo de observación en el telescopio espacial Hubble, y les sorprendió que se lo concedieran, rememoran ambos. Después analizaron durante un año los datos, aunque parte del tiempo tuvieron que invertirlo en aprender a usarlos. Sus observaciones mostraban que el tránsito del planeta había comenzado antes de lo debido, lo que implicaba la presencia de una luna. El tiempo de tránsito del planeta varió unos 20 minutos a lo largo de cinco años de datos. «Sabemos que hay algo que está zarandeando a ese planeta», afirma Kipping, «y creemos que es una luna».

Teachey y Kipping publicaron sus resultados en *Science Advances* en octubre de 2018. Sostienen que las pruebas apoyan la existencia de una luna del tamaño de Neptuno alrededor de Kepler-1625b, que a su vez es varias veces mayor que Júpiter. Sin embargo, se abstuvieron de afirmar públicamente que se trataba de un «descubrimiento». «Creo que la gente se sintió frustrada por la forma en que lo comunicamos», aventura Teachey. «Pensaron que tratábamos de atribuirnos el mérito del hallazgo y, al mismo tiempo, de cubrirnos las espaldas, porque no acabábamos de proclamarlo. Entiendo su frustración: ¿está ahí o no? Pero existen muchas incógnitas desconocidas.»

Justo después, otros astrónomos saltaron a la palestra. René Heller, del Instituto Max Planck para la Investigación del Sistema Solar, en Gotinga, reprodujo parte de los cálculos de Teachey, pero no halló indicios suficientes de la presencia de una luna. Laura Kreidberg, experta en atmósferas exoplanetarias, no logró validar una parte clave de los resultados. Kreidberg, que ahora dirige el Departamento de Física Atmosférica de Exoplanetas recientemente creado en el Instituto Max Planck de Astronomía de Heidelberg, recuerda haber tenido una conversación amistosa pero algo incómoda con Teachey unos meses después de la publicación de su artículo. «Alex trabajó muy duro en esto y no quiero minimizar lo que hizo», observa. «Yo irrumpí, por así decirlo, con muchos años de experiencia en el uso de este instrumento. Pero Alex tiene mi apoyo. Los dos queremos que la luna esté ahí. ¿No sería genial?»

### LA CARRERA

La atención que recibían las exolunas no hizo sino aumentar en los meses posteriores al trabajo de Kipping y Teachey. Varios grupos efectuaron sus propios análisis de los datos de Kepler en busca de variaciones en los tiempos de tránsito que pudieran indicar la existencia de lunas. Otros recurrieron a herramientas como el Instrumento para la Investigación Espectropolarimétrica de Alto Contraste de Exoplanetas (SPHERE), del Telescopio Muy Grande (VLT), en Chile. Cecilia Lazzoni, que acaba de completar su doctorado en la Universidad de Padua, afirmó haber encontrado una exoluna gigante a partir de los datos de SPHERE. En un artículo publicado en *Astronomy & Astrophysics*, su grupo la describió como la compañera de una enana marrón de masa muy baja, un objeto tenue y a mitad de camino entre un planeta y una estrella, que no quema hidrógeno pero que es muchas veces mayor que Júpiter. El mundo de Lazzoni y su acompañante podrían parecerse más a planetas gigantes binarios que a un mundo y su luna. Si estos objetos son comunes, los astrónomos deberán plantearse cómo definir con precisión qué constituye un planeta y una luna.

En 2019, Phil Sutton, de la Universidad de Lincoln, en Inglaterra, volvió a analizar el supersaturno J1407b. El planeta y sus anillos habían sido descubiertos por Eric Mamajek, ahora en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, y varios colaboradores. Sutton quería encontrar pruebas de la existencia de lunas que orbitaran fuera del sistema de anillos, como hacen la mayoría de las de Saturno, así que se propuso estudiar los 37 anillos de J1407b. Sin embargo, no pudo hallar ningún indicio de lunas externas. Más bien al contrario, concluyó que una

# Cómo detectar una exoluna

Aunque los astrónomos aún están perfeccionando los métodos de búsqueda de exoplanetas, ya hay quienes sueñan con encontrar lunas alrededor de esos mundos. En los últimos años, varios equipos han anunciado posibles detecciones, si bien todavía no se ha confirmado ninguna. Hasta ahora se han empleado dos técnicas principales: estudiar el oscurecimiento de una estrella cuando un planeta y su luna pasan por delante (*izquierda*), y buscar señales del vaivén causado en un planeta por efecto de un satélite (*abajo*).

### El método del tránsito

Si un planeta pasa entre su estrella y la Tierra, la luz de la primera se verá atenuada. La mayoría de los exoplanetas conocidos se han descubierto gracias a esta técnica.

Estrella anfitriona
Planeta
Brillo aparente de la estrella
Alto
Bajo
Tiempo →

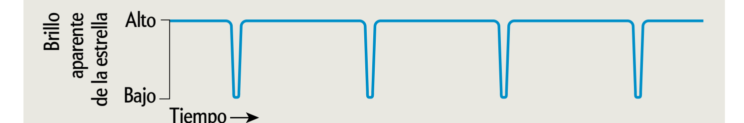
Este método también podría revelar lunas. El brillo de la estrella anfitriona podría atenuarse más de lo normal durante aquellos tránsitos en los que también la luna bloquea la luz.

Luna

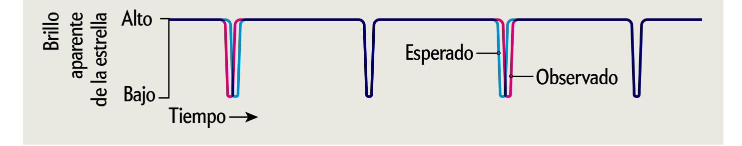
Si la luna se encontrase lo suficientemente lejos del planeta, la estrella anfitriona podría oscurecerse dos veces.

### Variación del tiempo de tránsito

Aun si una exoluna no está orientada de forma que atenúe el brillo de la estrella, sería posible detectarla gracias a pequeñas variaciones en la pauta de tránsitos del planeta. Los tránsitos planetarios suelen repetirse con la precisión de un metrónomo.




Sin embargo, en ocasiones pueden producirse antes o después de lo esperado. Eso podría indicar que el planeta posee una luna, en cuyo caso ambos experimentarían un ligero vaivén en torno a su centro de masas común. Dicho bamboleo causaría pequeños cambios en la cadencia de tránsitos del planeta.




JEN CHRISTIANSEN

luna semejante perturbaría el disco de un modo incompatible con las observaciones. «Todos nos entusiasmamos con la idea de que podíamos haber descubierto algo», afirma Sutton. Pero los reanálisis a menudo frustran las esperanzas: «Es realmente difícil confirmarlo».

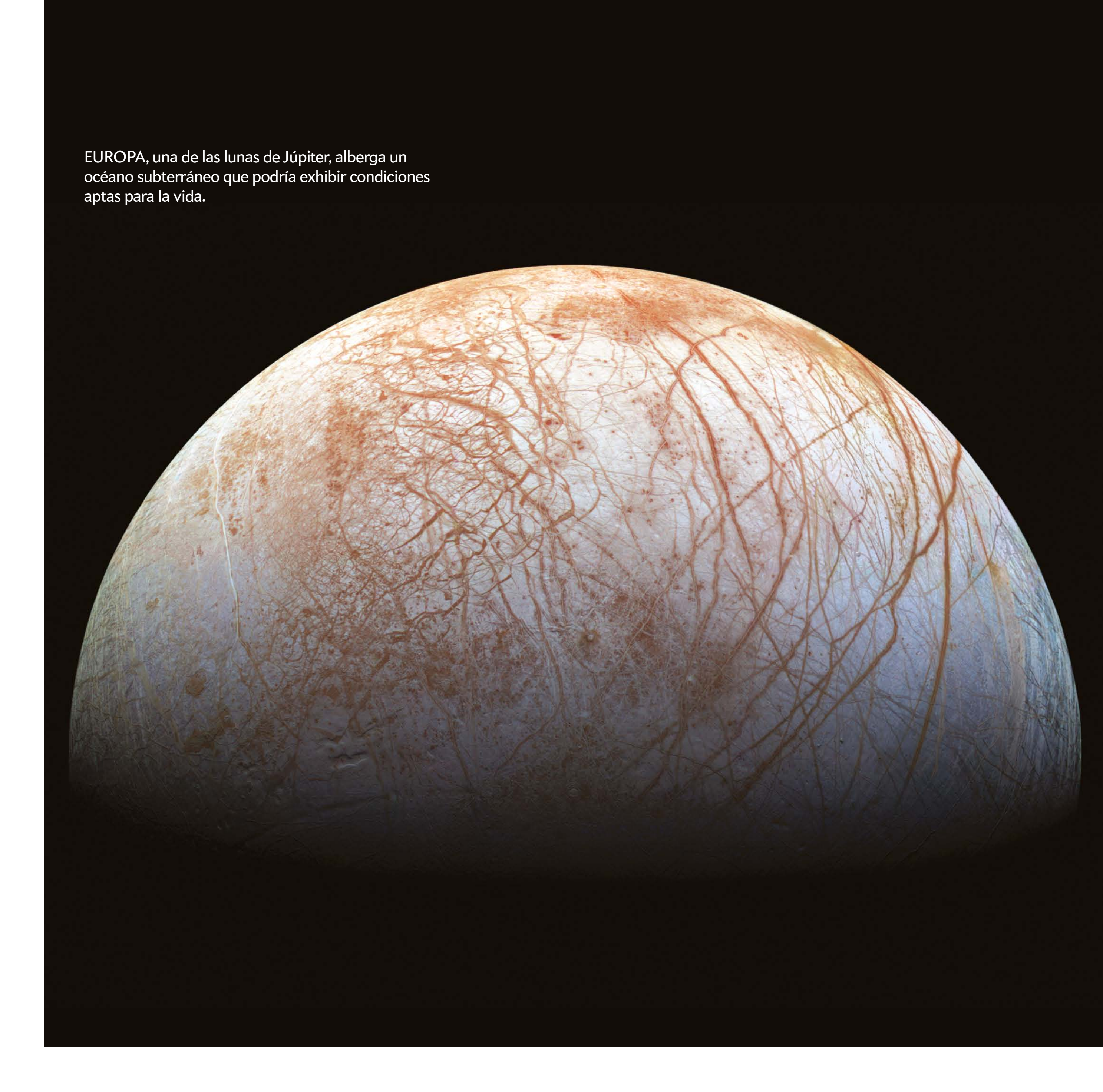
En verano de 2020, Fox analizó más datos de Kepler. Junto a su director de tesis, Paul Wiegert, examinó 13 planetas y encontró 8 con variaciones en el tiempo de tránsito potencialmente asociadas a exolunas. Pero, como señala el propio Fox, esos cambios también podían deberse a otras causas, desde la actividad estelar (fulguraciones, por ejemplo) hasta la existencia de otros planetas. «En varios casos logramos reproducir la variación en el tiempo de tránsito postulando una luna, pero en todos ellos podíamos también explicarla a partir de la presencia de un segundo planeta», admite.

Durante el verano, Fox dio a conocer sus resultados en un repositorio de prepublicaciones. Teachey fue crítico con el trabajo y también con la cobertura mediática que recibió, donde se daba por sentado que Fox estaba describiendo exolunas, cuando en realidad presentaba resultados que podían explicarse tanto con lunas como con planetas. En un campo joven y próspero, y en el que un descubrimiento puede acabar impulsando toda tu carrera, resulta inevitable que surjan problemas de este tipo, apunta Teachey. «No pretendemos ir contra la gente que investiga sobre lunas y tampoco queremos pasar por los guardianes del templo», asegura. «Pero, al mismo tiempo, esto forma parte del juego y cuestionaremos las conclusiones que nos parezcan infundadas.» El artículo de Fox y Wiegert se publicó en febrero de este año en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

En noviembre del año pasado se celebró por primera vez un congreso de exolunas: una conferencia informal organizada por Kipping a través de Zoom y que reunió a unos 80 investigadores de todo el mundo. Los expertos debatieron acerca de métodos de detección, teorías relativas a la formación de lunas y anillos, nuevas restricciones sobre el tamaño de las exolunas, posibles candidatas y otras cuestiones afines. «Creo que necesitamos estar un poco más organizados como comunidad para aumentar nuestras posibilidades de éxito», opina Kipping.

Una de las razones por las que aún no se ha confirmado ninguna detección es que los astrónomos les piden demasiado a sus telescopios. Distinguir la minúscula atenuación de brillo que se produce cuando un planeta pasa por delante de su estrella ya resulta difícil. Determinar, además, si el tránsito se ha adelantado o retrasado unos instantes, teniendo además en cuenta que los objetos en cuestión se encuentran a cientos de años luz de distancia, lo convierte en una exigencia mayúscula.

Kreidberg asegura sentirse frustrada por no haber podido averiguar por qué Teachey y ella obtuvieron respuestas distintas a partir de los mismos datos del Hubble. Pusieron en común sus métodos de procesamiento y ella trató de reproducir fielmente los pasos de Teachey, pero no logró conciliar los resultados. «Lo único que lamento es que no consiguiéramos encontrar la discrepancia», afirma. «Mi conclusión fue que estábamos excediendo las posibilidades del Hubble, que fue diseñado para



EUROPA, una de las lunas de Júpiter, alberga un océano subterráneo que podría exhibir condiciones aptas para la vida.

observar galaxias tenues y distantes, no planetas cercanos con lunas. Hacemos todo lo que podemos con el procesamiento de datos, pero extraer la señal es todo un arte.»

Otros retos son geométricos. Debido a las leyes de Kepler y de Newton, la órbita de una luna solo puede mantenerse estable cuando se halla lo suficientemente cerca de su planeta. Esa distancia mínima que garantiza la estabilidad se conoce como «radio de Hill», en honor al astrónomo del siglo XVIII George William Hill. Cuanto más cerca de su estrella orbita un planeta, menor es el radio de Hill y más probable es que la gravedad de la estrella lance la luna contra el planeta o que la expulse del sistema planetario.

Sin embargo, los telescopios Kepler, Hubble y otros suelen detectar planetas que orbitan muy cerca de sus respectivas estrellas, en ocasiones a distancias menores que la que media entre Mercurio y el Sol. Tales planetas resultan más fáciles de encontrar que otros más distantes, pero también es menos probable que tengan lunas. «Si buscamos planetas que transiten delante de sus estrellas, nos estamos fijando en cuerpos cuya influencia gravitatoria se ha visto muy reducida [con respecto a la de la estrella] y que tienen menos opciones de albergar una luna», explica Stephen Kane, planetólogo de la Universidad de California en Riverside. En 2017, Kane publicó un artículo donde sostenía que los sistemas planetarios compactos (como el de TRAPPIST-1, formado por siete planetas terrestres) probablemente no posean lunas.

Los planetas que orbitan a mayores distancias de su estrella, como Júpiter y Saturno, son más propensos a albergar lunas, señala Alice Quillen, astrónoma de la Universidad de Rochester que ha estudiado el supersaturno J1407b. Al encontrarse más lejos de su estrella, resulta menos probable que esta interfiera con la gravedad del planeta, lo que facilita la presencia de una luna. Si los exoplanetas distantes se parecen en su tamaño y composición a los mundos exteriores de nuestro sistema solar,

NASA, LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO (JPL), INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA E INSTITUTO SETI

puede que también sean más proclives a atrapar restos planetarios, asteroides errantes y planetas enanos. Se cree que Tritón, la mayor luna de Neptuno, es un planeta enano procedente del cinturón de Kuiper: un mundo pequeño, como Plutón, que fue capturado por Neptuno tras la formación del sistema solar.

Pero identificar planetas de gran tamaño y que orbiten a distancias considerables de su estrella no resulta sencillo, en parte porque tardan largo tiempo en completar una órbita. Júpiter, por ejemplo, necesita 12 años terrestres para dar una vuelta alrededor del Sol. Un caso así significaría que los astrónomos tendrían que observar el planeta durante más de dos décadas para detectar una señal clara. Además, es posible confundirlos con otros objetos. Las atenuaciones periódicas en el brillo de una estrella pueden señalar la presencia tanto de planetas exteriores como de una estrella compañera que, de tanto en tanto, pasa por delante de ella. «No podemos encontrar cuerpos en los sistemas planetarios exteriores porque es demasiado fácil confundirlos con estrellas binarias eclipsantes», incide Quillen. «Hay que dedicar mucho tiempo a descartar cosas que no son lo que buscamos.»

Las propias estrellas pueden también enmascarar las señales. El Sol es especialmente tranquilo, pero otras estrellas no lo son tanto; emiten fulguraciones y radiación y desarrollan manchas que pueden modificar su brillo aparente. «El problema a la hora de medir el brillo de una estrella es que, si aumentamos mucho más la precisión, comenzamos a observar la actividad estelar», explica Kane. «Las estrellas generarían un ruido equiparable a la señal que produciría una luna o incluso mayor. En esencia, eso establece un techo que no podemos superar y que supone un reto enorme.»

Con todo, algunos astrónomos no se desaniman y han recurrido a métodos matemáticos y observacionales creativos. Apurva Oza, de la Universidad de Berna, busca una gemela de Ío. Esta luna volcánica joviana puede distinguirse con unos prismáticos o un telescopio modesto, y fue uno de los cuatro satélites que Galileo descubrió en 1609. Pero, vista con instrumentos sensibles, es uno de los objetos más conspicuos del cielo. Desprende sodio y potasio, los cuales expulsa al espacio en grandes cantidades cuando la gravedad de Júpiter rasga sus entrañas y sus volcanes entran en erupción. Su exosfera llega a extenderse hasta una distancia 500 veces mayor que el radio de Júpiter, asegura Oza. Además, la huella de una exoluna similar a Ío sería visible sin importar dónde se encontrara el satélite durante un tránsito: podría hallarse detrás de su planeta y, a pesar de ello, su enorme nube de plasma seguiría siendo detectable con los instrumentos adecuados. «Si ese gas está por todas partes, simplemente la envolverá y podremos verlo durante el tránsito», explica Oza.

Los espectrógrafos de varios telescopios ya son capaces de detectar gases volátiles tanto en las estrellas como a su alrededor, añade el investigador. Algunos han identificado sodio, potasio y otras firmas químicas de origen desconocido. «Podría tratarse de una luna», prosigue Oza, «no parece tan descabellado cuando pensamos en ello de este modo». Sin embargo, una luna similar a Ío no constituiría un buen lugar para buscar vida. «En este caso no tratamos de encontrar entornos habitables, sino explosivos, que son los que predominan en el universo.»

### LECCIONES PARA EL FUTURO

Los astrónomos confían en que el telescopio espacial James Webb, cuyo lanzamiento está previsto para octubre de este año, permita buscar exolunas con mayor precisión. Kepler se diseñó para buscar planetas del tamaño de la Tierra alrededor de estrellas similares al Sol, así que usar sus datos para identificar objetos menores puede resultar complicado. Los investigadores solían emplear el telescopio espacial Spitzer, pero fue desactivado en enero de 2020. Por el momento, no hay muchos más instrumentos en la Tierra ni en el espacio capaces de encontrar exolunas, por lo que, por ahora, los investigadores recurren a nuevos métodos de procesamiento de datos.

«Nuestro trabajo no consiste solo en buscar esos objetos, sino también en concebir mejores formas de identificarlos», subraya Teachey. «La gente cree que un descubrimiento es un "momento eureka", pero más bien se trata de algo como "vamos a ver si no supera esta prueba, o esta otra... vaya, pues parece que sigue ahí".»

Los observatorios terrestres, como el Telescopio Extremadamente Grande, actualmente en construcción en el desierto chileno de Atacama, podrían detectar exolunas bajo determinadas circunstancias. El telescopio espacial europeo Tránsitos Planetarios y Oscilaciones Estelares (PLATO), cuyo lanzamiento está previsto para 2026, podría también contribuir a la búsqueda. Y a más largo plazo, un satélite como el Gran Explorador Ultravioleta, Óptico e Infrarrojo (LUVOIR), que quizá despegue a mediados de 2030, ofrecería excelentes posibilidades para rastrear exolunas. Sin embargo, tales proyectos aún deberán esperar varios años.

«Con las exolunas, ahora mismo las opciones son o el Hubble o nada, al menos hasta que entre en funcionamiento el James Webb», lamenta Kipping. Entretanto, el investigador confía en que la floreciente comunidad dedicada a buscar estos satélites extrasolares siga ideando nuevas estrategias para analizar los datos obtenidos hasta ahora. Kreidberg también alberga la esperanza de que el telescopio James Webb encuentre señales de exolunas, aunque admite que el primer hallazgo concluyente puede que aún quede lejos.

«Estamos en la vanguardia», concluye Kreidberg. «Averiguar qué sabemos y cuán seguros estamos es un proceso en constante evolución. Hay que ser optimista para trabajar en la búsqueda de exoplanetas.» Lo mismo parece aplicarse al caso de las exolunas. IyC

PARA SABER MÁS

Worlds without moons: Exomoon constraints for compact planetary systems. Stephen R. Kane en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 839, art. L19, abril de 2017.
Evidence for a large exomoon orbiting Kepler-1625b. Alex Teachey y David M. Kipping en *Science Advances*, vol. 4, eaav1784, octubre de 2018.
The search for disks or planetary objects around directly imaged companions: a candidate around DH Tauri B*. Cecilia Lazzoni et al. en *Astronomy and Astrophysics*, vol. 641, art. A131, septiembre de 2020.
Exomoon candidates from transit timing variations: eight Kepler systems with TTVs explainable by photometrically unseen exomoons. Chris Fox y Paul Wiegert en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 501, págs. 2378–2393, febrero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los anillos de un supersaturno. Matthew Kenworthy en *IyC*, marzo de 2016.
La Luna, una historia llena de sorpresas. Matthieu Laneuville en *IyC*, marzo de 2017.
Más acogedores que la Tierra. René Heller en *IyC*, marzo de 2015.

```
))}},{key:"keep
laceText(n),this.typewrite(t
;this.arrayPos===this.strings.length-1
y))}}},{key:"backspace",value:function(t
s.toggleBlinking(!1);var n=this.humaniz
smartBackspace){var i=s.strings[s.arrayP
s.strings.length?(s.arrayPos=0,s.options
omplete",value:function(){this.options.o
=s,this.pause.curString=t,this.pause.curS
ng=t;var e=t?"infinite":0;this.cursor.sty
gsIfNeeded",value:function(){this.shuffl
this;return this.el.className+=" "+this.
length>t.arrayPos?t.typewrite(t.strings[
attr?this.el.setAttribute(this.attr,t):t
},{key:"bindFocusEvents",value:function(
){t.el.value&&0!==t.el.value.length||t.s
),this.cursor.className="typed-cursor",t
();e["default"]=a,t.exports=e["default"]
rror("Cannot call a class as a function"
s[e];for(var n in s)Object.prototype.has
enumerable||!1,n.configurable=!0,"value"
(a),1=function(){function t(){i(this,t)}
nut="input"===t.el.tagName.toLower
=t.options.cursorChar,t.
t.startDelay=t
optio
```

COMPUTACIÓN

# DIEZ CÓDIGOS INFORMÁTICOS QUE HAN TRANSFORMADO LA CIENCIA

Ajenos a la atención mediática, varios avances en programación han cambiado para siempre la manera de investigar en biología, climatología, física y otras áreas

*Jeffrey M. Perkel*

ROOZBEH ESLAMI/UNSPLASH

DESDE MEDIADOS DEL SIGLO XX, varias herramientas informáticas han permitido sustituir el lápiz y el papel por el ordenador, el microscopio por los programas de procesamiento de imágenes y las bibliotecas por las bases de datos. La ciencia moderna sería irreconocible sin ellas.

**Jeffrey M. Perkel** es redactor de tecnología de la revista *Nature*.



En 2019, los investigadores del Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT, por sus siglas en inglés) nos permitieron vislumbrar por primera vez el verdadero aspecto de un agujero negro. Pero aquella célebre imagen que mostraba un anillo de luz brillante no era una fotografía tradicional. Era el resultado de un cálculo: una transformación matemática de los datos obtenidos por radiotelescopios de Estados Unidos, México, Chile, España y el Polo Sur. Junto con los artículos que documentaban sus hallazgos, los investigadores publicaron el código informático que habían empleado para que la comunidad científica pudiera ver —y aprovechar— lo que habían logrado.

Esa historia se repite cada vez más. Desde la astronomía hasta la zoología, tras todos los grandes resultados científicos de la era moderna hay un ordenador. Michael Levitt, biólogo computacional de Stanford que en 2013 compartió el premio Nobel de química por sus estrategias computacionales para modelizar estructuras químicas, subraya que los portátiles actuales tienen unas 10.000 veces más memoria y frecuencia de reloj que el ordenador construido en un laboratorio que él usaba en 1967, cuando comenzó el trabajo que le reportó el galardón. «Hoy tenemos a nuestra disposición una capacidad computacional asombrosa», señala. «El problema es que aún hay que pensar.»

Es aquí donde entra en escena el científico-programador. Una computadora potente no sirve para nada sin un programa capaz de abordar preguntas interesantes y sin investigadores que sepan escribirlo y usarlo. «La investigación actual está íntimamente ligada a la programación», destaca Neil Chue Hong, director del Instituto de Sostenibilidad del Software, una organización con sede en Edimburgo dedicada a mejorar el desarrollo y el uso de las aplicaciones informáticas en ciencia. «Está presente en todos los aspectos de un estudio.»

Como es lógico, son los descubrimientos científicos los que acaparan la atención mediática. Sin embargo, para entender de veras cómo funciona la ciencia moderna, merece la pena echar un vistazo entre bastidores y analizar los principales códigos informáticos que han transformado la investigación en las últimas décadas. Aunque una lista de este tipo nunca puede estar completa, las líneas que siguen muestran una selección de diez herramientas informáticas que, según las decenas de científicos consultados para este artículo, han cambiado para siempre la investigación.

## FORTRAN (1957)
### LENGUAJE PIONERO

Los primeros ordenadores modernos no eran fáciles de usar. La programación se hacía literalmente a mano, conectando bancos de circuitos con cables. Más adelante, el lenguaje máquina y el ensamblador permitieron que los usuarios empleasen código para programar las computadoras. Sin embargo, ambos seguían requiriendo un conocimiento profundo de la arquitectura del ordenador, lo que los dejaba fuera del alcance de muchos científicos.

Eso cambió en los años cincuenta con la aparición de los lenguajes simbólicos; en particular, con el lenguaje de «traducción de fórmulas», o Fortran, desarrollado por John Backus y su equipo en el laboratorio de IBM de San José, California. Con Fortran, los usuarios podían programar los ordenadores empleando instrucciones legibles para las personas, como $x = 3 + 5$. A continuación, un compilador convertía esas instrucciones en un código máquina rápido y eficaz.

Pero programar seguía sin ser sencillo. Al principio, había que usar tarjetas perforadas para introducir el código, y una simulación compleja podía requerir decenas de miles de ellas. Aun así, según Syukuro Manabe, climatólogo de la Universidad de Princeton, Fortran puso la programación al alcance de los investigadores que no eran expertos en computación. «Por primera vez pudimos programar los ordenadores nosotros mismos», rememora Manabe, que usó Fortran para desarrollar, junto con sus colaboradores, uno de los primeros modelos climáticos satisfactorios.

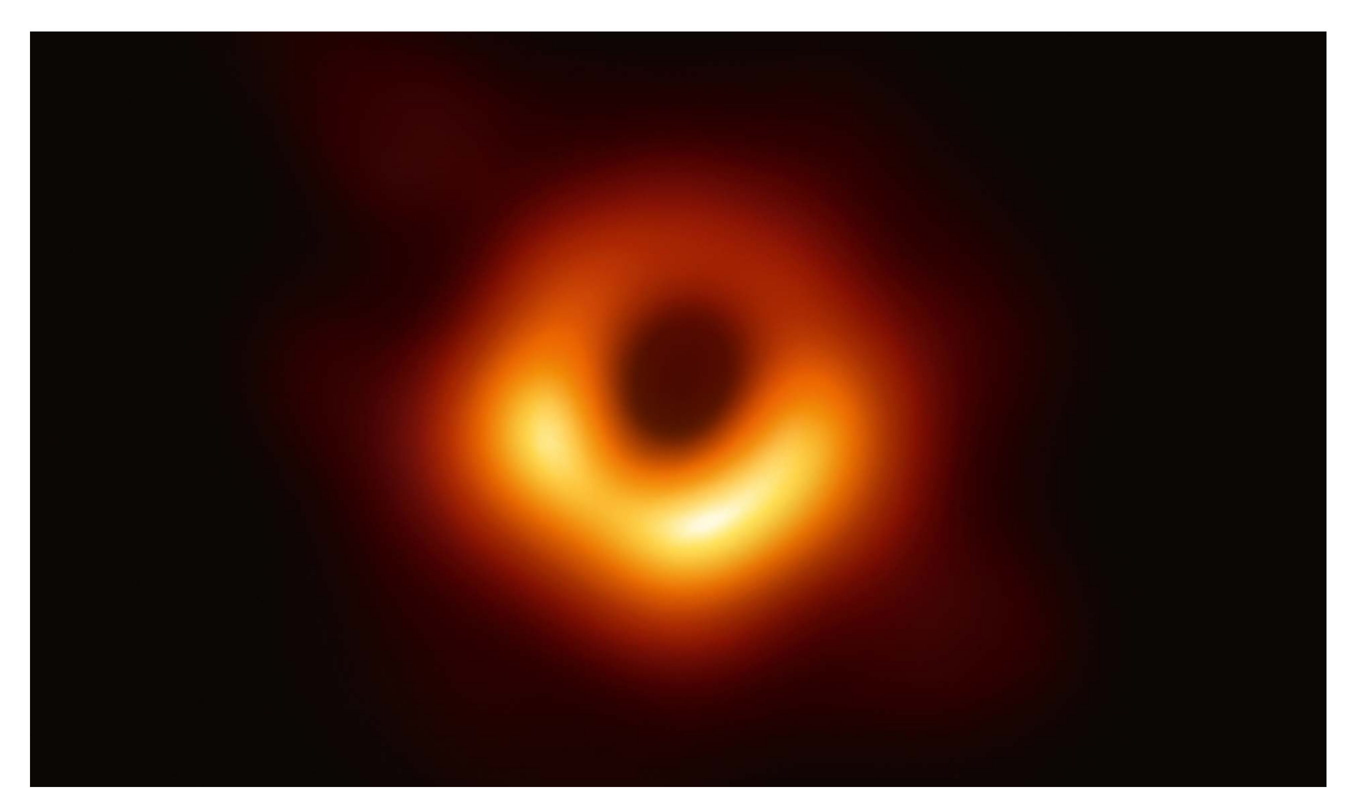
En su octava década de existencia, Fortran se sigue usando ampliamente en modelización climática, dinámica de fluidos,

EN SÍNTESIS

**Responsables directos** de un sinfín de descubrimientos científicos, los ordenadores son consustanciales a la investigación moderna. Sin embargo, este papel protagonista no obedece únicamente al aumento de la potencia de cómputo.

**Una clave** a menudo olvidada son los programas informáticos que han convertido a los ordenadores en máquinas fáciles de usar por parte de los científicos. Tales instrumentos han transformado la manera de trabajar en numerosos campos.

**Una consulta** a decenas de investigadores ha permitido elaborar una selección de diez herramientas transformadoras, desde Fortran y la transformada rápida de Fourier hasta los bancos de datos biológicos o el repositorio de prepublicaciones arXiv.



LA PRIMERA IMAGEN DE UN AGUJERO NEGRO fue publicada en 2019 por la colaboración del Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT). Los datos se tomaron durante cuatro días de abril de 2017, pero fueron necesarios dos años de análisis computarizado para convertirlos en la célebre fotografía.

COLABORACIÓN DEL TELESCOPIO DEL HORIZONTE DE SUCESOS (EHT)

química computacional o en cualquier disciplina que implique álgebra lineal compleja y requiera potentes ordenadores para efectuar cálculos a gran velocidad. El código resultante es rápido y todavía hay muchos programadores que saben escribirlo. El clásico código fuente en Fortran sigue vivo en laboratorios y en superordenadores de todo el mundo. «Los programadores de antaño sabían lo que hacían», asegura Frank Giraldo, experto en matemáticas aplicadas y modelos climáticos de la Escuela Naval de Posgrado de Monterrey, en California. «Tenían muy en cuenta la memoria del ordenador, porque disponían de muy poca.»

## TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (1965)
### LA REINA DEL PROCESAMIENTO DE SEÑALES

Cuando los radioastrónomos exploran el cielo, captan una cacofonía de señales complejas que cambian con el tiempo. Para entender la naturaleza de esas ondas de radio, necesitan estudiarlas en función de su frecuencia, algo que llevan a cabo mediante un procedimiento matemático conocido como transformada de Fourier. El problema reside en que este no es muy eficiente, ya que, para aplicarlo a un conjunto de datos de tamaño $N$, exige efectuar $N^2$ cálculos.

En 1965, los matemáticos James Cooley, de IBM, y John Tukey, de los Laboratorios Bell y la Universidad de Princeton, concibieron una manera de acelerar el proceso. Usando la recursión, una estrategia basada en la premisa de «divide y vencerás», donde un algoritmo se llama a sí mismo una y otra vez, la transformada rápida de Fourier (ampliamente conocida como FFT, por sus siglas en inglés) reduce el número de pasos necesarios a $N\log_2(N)$. Esta ventaja aumenta a medida que crece $N$: para mil puntos, la velocidad se multiplica por 100; para un millón, por 50.000.

El «hallazgo» fue en realidad un redescubrimiento: Carl Friedrich Gauss ya había obtenido un resultado equivalente en 1805, aunque nunca lo publicó, explica Nick Trefethen, matemático de la Universidad de Oxford. Cooley y Tukey sí lo hicieron, y con ello abrieron la puerta a aplicaciones en campos como el procesamiento de señales digitales, el análisis de imágenes o la biología estructural. «Realmente es uno de los grandes acontecimientos de las matemáticas aplicadas y la ingeniería», afirma Trefethen. Existen muchas implementaciones de la FFT; una opción popular es la llamada «transformada de Fourier más rápida del Oeste» (FFTW).

Paul Adams, que dirige la División de Biofísica Molecular y Bioimagen Integrada del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, en California, recuerda que, cuando refinó la estructura de la proteína bacteriana GroEL en 1995, el cálculo se alargó durante «muchísimas horas, si no días», incluso con la FFT y un superordenador. «Sin la FFT, ni siquiera sé cómo podríamos haberlo hecho de manera realista», admite. «Habría tardado una eternidad.»

## BASES DE DATOS BIOLÓGICOS (1965)
### CATÁLOGOS MOLECULARES

Hoy en día, las bases de datos son tan consustanciales a la investigación científica que es fácil pasar por alto que dependen de programas informáticos. En las últimas décadas, estos recursos han aumentado notablemente de tamaño y han dado forma a numerosos campos. Sin embargo, puede que ninguno haya experimentado una transformación tan profunda como la biología.

Las enormes bases de datos de genomas y proteínas que existen actualmente tienen su origen en el trabajo de Margaret Dayhoff, pionera de la bioinformática en la Fundación Nacional

de Investigación Biomédica de Estados Unidos. A principios de los años sesenta, cuando los biólogos trataban de descifrar las secuencias de aminoácidos de las proteínas, Dayhoff empezó a cotejar esa información para buscar pistas sobre las relaciones evolutivas entre distintas especies. Su *Atlas de secuencias y estructuras de proteínas*, publicado por primera vez en 1965 junto con otros tres autores, describía lo que se sabía a la sazón sobre las secuencias, estructuras y similitudes de 65 proteínas. Aquella recopilación fue la primera «no vinculada a una pregunta de investigación concreta», escribió el historiador Bruno Strasser en 2010. Y sus datos se codificaron en tarjetas perforadas, lo que permitió realizar búsquedas en la base de datos y ampliarla.

Más tarde llegaron otras bases de datos biológicos informatizadas. El Banco de Datos de Proteínas, que detalla más de 170.000 estructuras macromoleculares, se puso en marcha en 1971. Russell Doolittle, biólogo evolutivo de la Universidad de California en San Diego, creó otra base de datos de proteínas llamada Newat en 1981. Y en 1982 se publicó la base de datos que acabaría convirtiéndose en GenBank, el archivo de secuencias de ADN que mantienen los Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos.

Esos recursos demostraron su utilidad en julio de 1983, cuando dos equipos dirigidos por Michael Waterfield, bioquímico especializado en proteínas del Fondo Imperial para la Investigación del Cáncer de Londres, y Doolittle anunciaron de forma independiente una semejanza entre la secuencia de un cierto factor de crecimiento humano y la de una proteína de un virus que provocaba cáncer en monos. La observación sugirió un mecanismo de oncogénesis viral: al imitar un factor de crecimiento, el virus induce la proliferación incontrolada de las células. «Eso hizo que se le encendiera una bombilla a algunos biólogos que no se dedicaban a la informática ni a la estadística», sostiene James Ostell, exdirector del Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI) de EE.UU. «Es posible entender cosas sobre el cáncer comparando secuencias.»

Según Ostell, aquel descubrimiento también señaló «el advenimiento de la biología objetiva». Además de diseñar experimentos para verificar hipótesis concretas, los investigadores podían explorar bases de datos públicas en busca de conexiones que nunca se les habrían ocurrido a quienes reunieron los datos. Esta posibilidad aumenta de forma drástica cuando se vinculan distintos conjuntos de datos, algo que los programadores del NCBI lograron en 1991 con Entrez, una herramienta que permite explorar desde el ADN hasta las proteínas y la bibliografía científica, y viceversa. Stephen Sherry, actual director en funciones del NCBI, utilizó Entrez durante su doctorado. «En aquella época me parecía algo mágico», evoca.

## MODELO DE CIRCULACIÓN GENERAL (1969)
### TIEMPO Y CLIMA

A la conclusión de la Segunda Guerra Mundial, el pionero de la computación John von Neumann comenzó a usar los mismos ordenadores que unos años antes habían calculado trayectorias balísticas y diseños de armas para abordar el problema de la predicción meteorológica. Hasta ese momento, explica Manabe, «la previsión del tiempo era puramente empírica» y se recurría a la experiencia y la intuición para pronosticar lo que sucedería. El equipo de Von Neumann, en cambio, «intentó hacer predicciones numéricas basadas en las leyes de la física».

Las ecuaciones se conocían desde hacía décadas, observa Venkatramani Balaji, director del Grupo de Sistemas de Modelización en el Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos (GDFL) de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de Estados Unidos. Pero los primeros meteorólogos no podían resolverlas de manera eficaz: había que introducir las condiciones existentes, calcular cómo cambiarían en un corto período de tiempo y repetir el proceso: algo tan laborioso que tornaba imposible completar los cálculos antes de que cambiasen las propias condiciones meteorológicas. En 1922, el matemático Lewis Fry Richardson se pasó meses calculando una previsión a seis horas vista para Múnich (en concreto, calculó un pronóstico para una fecha pasada para la que existían abundantes registros meteorológicos: incorporó todos los datos disponibles sobre las condiciones de ese día a las 7:00 de la mañana e intentó «predecir» el tiempo que había hecho seis horas más tarde). El resultado, según una crónica, fue «tremendamente inexacto» e incluía predicciones que «jamás podrían darse bajo ningunas condiciones terrestres conocidas». Los ordenadores lograron que el problema fuera tratable.

A finales de los años cuarenta, Von Neumann formó un grupo de predicción meteorológica en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. En 1955, un segundo equipo, el GDFL, comenzó a trabajar en lo que él llamaba «la predicción infinita»; es decir, la modelización del clima. Manabe, que se unió al grupo de modelización climática en 1958, comenzó a trabajar en modelos atmosféricos, mientras que su compañero Kirk Bryan se ocupó de los del océano. En 1969, combinaron ambos con éxito y crearon lo que la revista *Nature* calificó en 2006 de «hito» de la computación científica. Los modelos actuales pueden dividir la superficie del planeta en cuadrados de 25 por 25 kilómetros, y la atmósfera en decenas de niveles. En cambio, el modelo combinado del océano y la atmósfera de Manabe y Bryan empleaba cuadrados de 500 kilómetros de lado, nueve niveles y solo cubría una sexta parte del globo. No obstante, recalca Balaji, «aquel modelo fue muy importante» y permitió que el equipo hiciera algo completamente nuevo: estudiar con un ordenador los efectos del aumento de la concentración de dióxido de carbono.

## BLAS (1979)
### PROCESAMIENTO NUMÉRICO

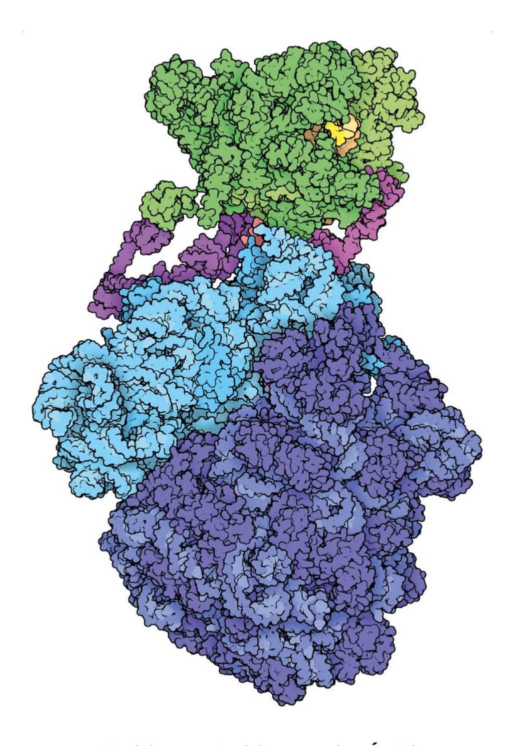
La computación científica suele implicar operaciones matemáticas relativamente sencillas con vectores y matrices. Lo único que ocurre es que hay un enorme número de ellas. Sin embargo, en los años setenta no existía un conjunto de herramientas informáticas universalmente aceptadas para llevar a cabo dichas operaciones. Como resultado, los programadores que trabajaban en ciencia se pasaban el tiempo diseñando códigos eficientes para hacer cálculos básicos, en lugar de centrarse en las cuestiones científicas.

Lo que necesitaba el mundo de la programación era un estándar. Y en 1979 lo obtuvo: BLAS, siglas en inglés de Subprogramas Básicos de Álgebra Lineal. Esta especificación, que siguió evolucionando hasta 1990, definió decenas de rutinas esenciales para las matemáticas vectoriales y, más tarde, para las matriciales. En la práctica, BLAS redujo estas operaciones a una unidad básica de cálculo tan fundamental como la suma y la resta, afirma Jack Dongarra, científico computacional de la Universidad de Tennessee en Knoxville que formó parte del equipo de desarrollo de BLAS.

BLAS «probablemente sea la interfaz más relevante jamás definida para la computación científica», opina Robert van de Geijn, científico computacional de la Universidad de Texas en

Austin. Además de proporcionar nombres estandarizados para las funciones habituales, los investigadores podían estar seguros de que los códigos basados en BLAS funcionarían del mismo modo en cualquier computadora. Y los fabricantes de ordenadores también pudieron desarrollar implementaciones de BLAS optimizadas para sus equipos.

Más de 40 años después, BLAS constituye el corazón de la computación científica: es el código que hace funcionar el *software* científico. Lorena Barba, ingeniera mecánica y aeroespacial de la Universidad George Washington, se refiere a él como «la maquinaria que hay dentro de cinco capas de código». «Es la estructura sobre la que hacemos los cálculos», añade Dongarra.



EL BANCO DE DATOS DE PROTEÍNAS, una gran colaboración internacional, contiene más de 170.0000 estructuras moleculares en tres dimensiones, como la de este «expresoma» bacteriano. Iniciado en 1971, hoy constituye una herramienta fundamental en biología molecular y genómica.



### NIH IMAGE (1987)
### ESENCIAL EN MICROSCOPÍA

A principios de los años ochenta, el programador Wayne Rasband trabajaba en un laboratorio de neuroimagen de los Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos. El grupo disponía de un escáner para digitalizar radiografías, pero no tenía forma de visualizarlas o analizarlas en su ordenador. Así que Rasband escribió un programa a tal efecto.

Dicho programa se diseñó expresamente para una minicomputadora PDP-11 de 150.000 dólares: un ordenador decididamente no personal montado en un bastidor. Pero, en 1987, Apple lanzó su Macintosh II, una opción más manejable y mucho más asequible. «Me pareció evidente que resultaría más adecuado como sistema para analizar imágenes de laboratorio», relata Rasband. Así que adaptó su programa a la nueva plataforma y lo rebautizó. Aquello puso la semilla de un ecosistema de programas de análisis de imágenes.

NIH Image y sus sucesores permitieron que los investigadores vieran y cuantificaran casi cualquier imagen en cualquier ordenador. A esta familia pertenecen ImageJ, una versión basada en Java que escribió Rasband para los usuarios de Windows y Linux, y Fiji, una distribución de ImageJ que incluye complementos clave desarrollada por el grupo de Pavel Tomancak en el Instituto Max Planck de Biología Celular Molecular y Genética de Dresde. «No cabe duda de que ImageJ es nuestra herramienta básica», afirma Beth Cimini, bióloga computacional que trabaja en la Plataforma de Imagen del Instituto Broad de Cambridge, en Massachusetts. «Jamás he hablado con un solo biólogo que haya usado un microscopio pero no ImageJ o su proyecto derivado, Fiji.»

Ello se debe en parte a que se trata de herramientas gratuitas, apunta Rasband. Pero también influye la facilidad con que los usuarios pueden adaptarlas a sus necesidades, añade Kevin Eliceiri, ingeniero biomédico de la Universidad de Wisconsin-Madison y cuyo equipo ha tomado el relevo en el desarrollo de ImageJ desde la jubilación de Rasband. ImageJ cuenta con una interfaz de usuario engañosamente simple y minimalista que apenas ha cambiado desde los años noventa. Sin embargo, la herramienta se puede ampliar sin límites gracias a su grabadora de macros integrada (que sirve para guardar flujos de trabajo, al registrar secuencias de clics del ratón y selecciones de los menús), su gran compatibilidad con archivos de distintos formatos y su flexible arquitectura de complementos (*plug-ins*).

Curtis Rueden, jefe de programación del grupo de Eliceiri, asegura que cientos de personas han contribuido con esas extensiones. Tales accesorios han ampliado enormemente el conjunto de herramientas para los investigadores, al añadir funciones que permiten seguir objetos a lo largo del tiempo en los vídeos o identificar células de manera automática, por poner solo dos ejemplos. «El objetivo del programa no es ser el no va más», sostiene Eliceiri, «sino responder a las necesidades de sus usuarios. Y a diferencia de Photoshop y otros programas, ImageJ puede ser como uno quiera».

### BLAST (1990)
### EL BUSCADOR DE SECUENCIAS

Puede que el mejor indicador de la relevancia cultural de un programa sea que su nombre se convierta en un verbo. En relación con las búsquedas en Internet, podemos pensar en Google. En genética, un equivalente es BLAST.

Los cambios evolutivos quedan grabados en las secuencias moleculares en forma de sustituciones, eliminaciones, huecos y reordenamientos. Al buscar semejanzas entre secuencias, sobre todo de proteínas, los investigadores pueden descubrir relaciones evolutivas y comprender la función de los genes. La clave reside en hacerlo de forma rápida y exhaustiva a partir de bases de datos de información molecular que crecen rápidamente.

Dayhoff aportó una pieza clave al rompecabezas en 1978. Ideó una matriz de «mutaciones puntuales aceptadas» que permitía a los investigadores evaluar la relación entre dos proteínas basándose no solo en la similitud de sus secuencias, sino también en la distancia evolutiva entre ellas. En 1985, William Pearson, de la Universidad de Virginia en Charlottesville, y David Lipman, del NCBI, introdujeron FASTP, un algoritmo que combinaba la matriz de Dayhoff con la posibilidad de realizar búsquedas rápidas.

Años más tarde, Lipman, Warren Gish y Stephen Altschul, del NCBI, Webb Miller, de la Universidad Estatal de Pensilvania, y Gene Myers, de la Universidad de Arizona, desarrollaron una versión aún más potente: la Herramienta Básica de Búsqueda de Alineamientos Locales (BLAST). Lanzada en 1990, BLAST aunaba la velocidad de búsqueda necesaria para manejar bases de datos cada vez mayores con la capacidad de detectar coincidencias más distantes desde el punto de vista evolutivo. Al mismo tiempo, la herramienta podía calcular la probabilidad de que esas coincidencias se produjeran por casualidad.

Los resultados eran muy rápidos, destaca Altschul. «Podías introducir la consulta y, tras tomar un sorbo de café, ya había terminado.» Pero lo más importante es que era fácil de usar. En

una época en que las bases de datos se actualizaban por correo postal, Gish estableció un sistema de correo electrónico —y más adelante uno en línea— que permitía a los usuarios realizar búsquedas en los ordenadores del NCBI de forma remota, lo cual garantizaba que sus resultados estaban siempre actualizados.

El sistema aportó una herramienta transformadora al incipiente campo de la genómica, afirma Sean Eddy, biólogo computacional de Harvard, una forma de averiguar la función de genes desconocidos a partir de aquellos con los que estaban relacionados. Y proporcionó un ingenioso neologismo usado en los laboratorios de secuenciación de todo el mundo. «Es uno de esos nombres que se han convertido en un verbo», corrobora Eddy. «A menudo hablamos de *blastear* secuencias.»

### ARXIV.ORG (1991)
### REPOSITORIO DE PREPUBLICACIONES

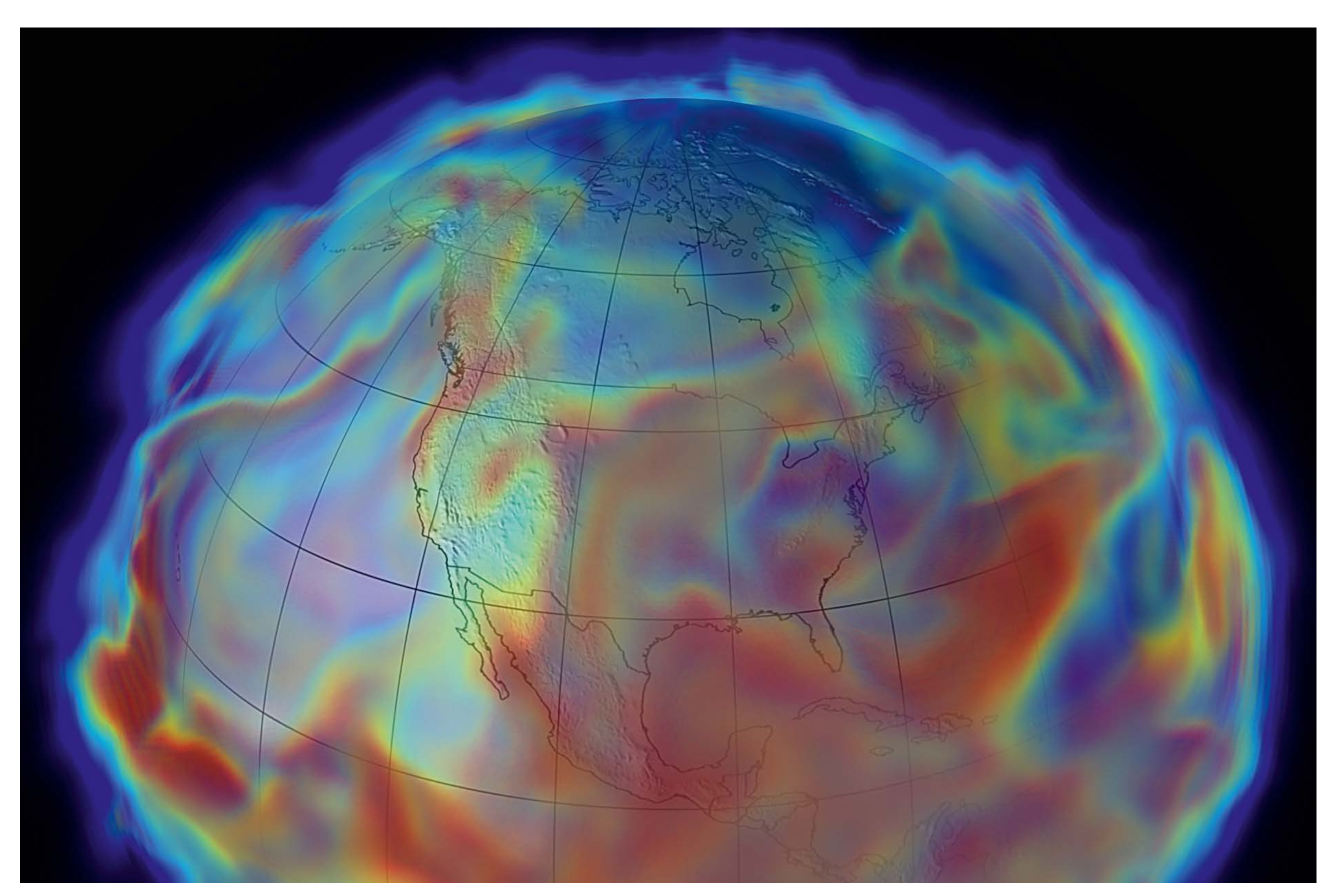
A finales de los años ochenta, los físicos de partículas solían enviar por correo postal copias de sus artículos a otros investigadores a modo de cortesía y para que hicieran comentarios. Sin embargo, solo unos pocos elegidos recibían esas copias. «Los que estaban más abajo en el escalafón dependían de la benevolencia de los que figuraban en la lista preferente. Y los investigadores en ciernes de instituciones más modestas a menudo permanecían totalmente al margen de ese circuito privilegiado», escribió en 2011 el físico Paul Ginsparg.

En 1991, Ginsparg, que por entonces trabajaba en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, escribió un programa para responder correos electrónicos de forma automática con el objetivo de equilibrar la balanza. Los suscriptores recibían a diario listas de prepublicaciones, donde cada uno de los artículos llevaba asociado un identificador. Mediante un solo correo electrónico, los usuarios de todo el mundo podían enviar u obtener un manuscrito del sistema informático del laboratorio, recibir listas de artículos nuevos o hacer búsquedas por autor o por título.

La idea de Ginsparg era conservar los artículos durante tres meses y limitarse a contenidos relevantes para la comunidad de físicos de altas energías. Pero entonces, otro científico lo convenció para que conservara los manuscritos por tiempo indefinido. «Ese fue el momento en que dejó de ser un tablón de anuncios y se convirtió en un archivo», comenta. Después empezaron a llegar multitud de artículos de muchos otros campos. En 1993, Ginsparg trasladó el sistema a la World Wide Web y, en 1998, le dio el nombre que todavía conserva hoy: arXiv.org.

Treinta años después, arXiv alberga en torno a 1,8 millones de prepublicaciones, todas ellas disponibles de forma gratuita, y recibe más de 15.000 envíos y unos 30 millones de descargas al mes. «No es difícil entender por qué arXiv es un servicio tan popular», escribieron los editores de *Nature Photonics* hace una década con motivo del vigésimo aniversario del sitio. «El sistema ofrece a los investigadores una forma rápida y cómoda de plantar una bandera que muestre lo que han hecho y cuándo lo han hecho, evitándose las molestias y el tiempo que requiere la revisión por pares en una revista.»

El éxito del sitio impulsó el auge de archivos similares en biología, medicina, sociología y otras disciplinas. Su impacto puede verse hoy en las decenas de miles de prepublicaciones



TRENT SCHINDLER/NASA/CENTRO GODDARD/UNIVERSIDAD DE MARYLAND EN BALTIMORE COUNTY

LOS MODELOS CLIMÁTICOS ACTUALES pueden dividir la superficie de todo el planeta en un retículo con celdas de 25 kilómetros de lado y la atmósfera en decenas de niveles. Esta imagen muestra la distribución de la humedad atmosférica el 17 de junio de 1993.

que han aparecido sobre el SARS-CoV-2. «Resulta gratificante ver cómo una metodología que hace 30 años se consideraba heterodoxa fuera de la comunidad de la física de partículas se considera hoy, de forma más general, como algo obvio y natural», valora Ginsparg. «En ese sentido, se parece a un proyecto de investigación exitoso.»

### IPYTHON NOTEBOOK (2011)
### EXPLORADOR DE DATOS

En 2001, Fernando Pérez era un estudiante de doctorado «con ánimo de procrastinar» cuando decidió ocuparse de un componente básico de Python. Python es un lenguaje interpretado, lo que significa que los programas se ejecutan línea a línea. Los programadores tienen a su disposición un tipo de herramienta computacional «de llamada y respuesta» denominada bucle de lectura, evaluación e impresión (REPL, por sus siglas en inglés), donde escriben el código, y un programa llamado intérprete lo ejecuta. Los REPL permiten explorar e iterar con rapidez. Pero Pérez, hoy profesor en el Departamento de Estadística de la Universidad de California en Berkeley, observó que el de Python no estaba pensado para la ciencia. Por ejemplo, los usuarios no podían precargar fácilmente módulos de código o mantener abiertas las visualizaciones de datos. Así que Pérez escribió su propia versión.

El resultado fue IPython, un intérprete «interactivo» de Python con tan solo 259 líneas de código que Pérez presentó en diciembre de 2001. Una década más tarde, Pérez, en colaboración con el físico Brian Granger y el matemático Evan Patterson, trasladó esa herramienta a los navegadores web y lanzó IPython Notebook, lo que supuso el pistoletazo de salida a una revolución en la ciencia de datos.

Al igual que otros cuadernos computacionales, IPython Notebook combinaba código, resultados, gráficos y texto en un único documento. Pero, a diferencia de otros proyectos similares, era de código abierto e invitaba a contribuir a una extensa comunidad de desarrolladores. Además, era compatible con Python, un lenguaje popular entre los científicos. En 2014, IPython se convirtió en el proyecto Jupyter, que admite decenas de lenguajes de programación y permite que los usuarios exploren datos en superordenadores remotos con la misma facilidad que si estuvieran en sus propios portátiles.

«Para los científicos de datos, Jupyter se ha convertido en un estándar de facto», escribió la revista *Nature* en 2018. En ese momento había 2,5 millones de cuadernos Jupyter en la plataforma de desarrollo colaborativo GitHub. Hoy son casi 10 millones, incluidos los que documentan el descubrimiento de las ondas gravitacionales en 2016 y la imagen de un agujero negro de 2019. «Haber hecho una pequeña contribución a esos proyectos resulta muy gratificante», asegura Pérez.

### ALEXNET (2012)
### APRENDIZAJE ARTIFICIAL RÁPIDO

Hay dos tipos de inteligencia artificial (IA): una que usa reglas codificadas, y otra que posibilita que los ordenadores «aprendan» emulando la estructura neuronal del cerebro. Durante décadas, explica Geoffrey Hinton, científico computacional de la Universidad de Toronto, los investigadores en IA descartaron este último enfoque por considerarlo «absurdo». En 2012 Alex Krizhevsky e Ilya Sutskever, estudiantes de doctorado de Hinton, demostraron que no lo era.

El escenario fue ImageNet, un certamen anual donde los investigadores entrenan su sistema de IA usando una base de datos de un millón de imágenes de objetos cotidianos y, a continuación, ponen a prueba el algoritmo con otro conjunto de imágenes. Por aquel entonces, los mejores algoritmos clasificaban mal una cuarta parte de ellas, rememora Hinton. El AlexNet de Krizhevsky y Sutskever, un algoritmo de «aprendizaje profundo» basado en redes neuronales, alcanzó una tasa de error del 16 por ciento. «Básicamente la redujimos a la mitad, o casi», subraya Hinton.

Hinton afirma que el éxito de su equipo en 2012 se debió a la combinación de diversos factores: un conjunto de datos de entrenamiento lo bastante grande, un código de gran calidad, y la recién descubierta potencia de las unidades de procesamiento gráfico, las cuales se diseñaron originalmente para mejorar el rendimiento de los gráficos en los ordenadores. «De repente podíamos ejecutar el algoritmo 30 veces más rápido», destaca, «o aprender a partir de una cantidad de datos 30 veces mayor». El verdadero avance algorítmico, prosigue Hinton, se produjo tres años antes, cuando su laboratorio creó una red neuronal capaz de reconocer el habla con más precisión que los sistemas que llevaban décadas perfeccionándose. «Los resultados solo eran un poco mejores», admite Hinton, «pero el futuro ya estaba escrito».

Esos logros anunciaron el auge del aprendizaje profundo en laboratorios, centros médicos y otros ámbitos. Gracias a ellos, los teléfonos móviles son capaces de entender las consultas de voz, y las herramientas de análisis de imágenes pueden distinguir las células en las micrografías. Por ello, AlexNet ocupa un lugar entre las múltiples herramientas que han transformado de manera radical la ciencia y, con ella, el mundo. IyC

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 589, págs. 344-348, 2021.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2021

Con la colaboración de nature

**PARA SABER MÁS**

**Climate calculations with a combined ocean-atmosphere model.** Syukuro Manabe y Kirk Bryan en *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 26, págs. 786-789, julio de 1969.
**Basic linear algebra subprograms for Fortran usage.** Charles L. Lawson et al. en *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 5, págs. 308-323, septiembre de 1979.
**Collecting, comparing, and computing sequences: The making of Margaret O. Dayhoff's *Atlas of protein sequence and structure*, 1954-1965.** Bruno J. Strasser en *Journal of the History of Biology*, vol. 43, págs. 623-660, diciembre de 2010.
**It was twenty years ago today...** Paul Ginsparg en arXiv:1108.2700, agosto de 2011.
**ImageNet classification with deep convolutional neural networks.** Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever y Geoffrey E. Hinton en *Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems*, págs. 1097-1105, diciembre de 2012.
**Why Jupyter is data scientists' computational notebook of choice.** Jeffrey M. Perkel en *Nature*, vol. 563, págs. 145-146, noviembre de 2018.

**EN NUESTRO ARCHIVO**

**Ingeniería empírica de programas.** Greg Wilson y Jorge Aranda en *IyC*, enero de 2013.
**La naturaleza de la prueba científica en la era de las simulaciones.** Kevin Heng en *IyC*, mayo de 2015.
**El pensamiento computacional en ciencia.** Peter J. Denning en *IyC*, junio de 2017.

por Marc Boada Ferrer

**Marc Boada Ferrer** es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



# Tectónica de placas en directo

## Fallas, pliegues, clivajes, colisiones entre continentes, cabalgamientos y otros muchos fenómenos geológicos en nuestro laboratorio

Fue casi por casualidad. Había caído en mis manos una guía de puntos de interés geológico. Mientras la estaba hojeando, encontré un artilugio que me hizo recordar algo interesantísimo: la geología no es solo una ciencia de campo; no es solo una ciencia «de bota», sino también «de bata». En el laboratorio podemos realizar experimentos para modelizar los fenómenos geológicos que observamos en la naturaleza, «acelerar» el paso del tiempo y comprender mucho mejor la formación de las grandiosas estructuras que nos muestra el sustrato sólido de la Tierra.

En efecto, a poco que nos desplacemos por la superficie de nuestro planeta, observaremos bellísimas arrugas (el relieve), surcadas por capas y estratos deformados (la tectónica), resultados de la acción de potentísimos esfuerzos mecánicos de la corteza terráquea. Pese a la espectacularidad y el interés científico de estos fenómenos, la geología es una ciencia olvidada en muchas de nuestras aulas. Por poner un ejemplo, nuestros jóvenes ignoran a menudo la importancia de los yacimientos minerales, las condiciones de su formación, los métodos de explotación y hasta qué punto es esencial la geología para proveernos de todo cuanto necesitamos —incluido el móvil que tanto les interesa, engendrado a partir de centenares de minerales—.

¿Qué podemos hacer para mejorar la enseñanza de la geología? ¿Cómo podemos despertar el interés de nuestros alumnos? Desde esta sección recomendamos recurrir a experimentos «de verdad», reales, visuales y tangibles. Y es aquí donde entra en escena el artefacto que descubrí en aquel libro: una sencilla máquina de deformación de estratos, una especie de modelo analógico que capta lo esencial de la formación de pliegues, fallas y otras muchas estructuras.

Desde que en 1879 Gabriel-Auguste Daubrée publicara sus célebres *Estudios sintéticos de geología experimental*, los dispositivos de modelización geológica para la enseñanza consisten, en lo esencial, en una caja de madera con la parte frontal transparente, dotada de un largo tornillo roscado que desplaza un émbolo rectangular que se mueve por su interior. Ese émbolo, o pistón, comprime distintos materiales (arena, barro o incluso láminas de espuma de poliuretano), deformando sus estructuras y formando pliegues y fallas. Su construcción es fácil, pero debemos tener en cuenta ciertos detalles.

Para empezar, cuidado con el tamaño. No podemos subestimar la potencia y la resistencia mecánica necesarias para que nuestro aparato funcione de manera fiable. Para entender mejor las limitaciones del tamaño, observemos las imágenes *1a* y *1b*. Al inicio, finas láminas de sal común coloreada se extienden formando estratos continuos y regulares. Tras desplazar el émbolo unos 200 milímetros, se comprimen: se reduce la extensión horizontal y aumenta mucho el espesor vertical. Al principio, el esfuerzo mecánico que debemos realizar es pequeño. Pero, conforme crece el grosor de los estratos, más nos cuesta mover el tornillo de presión. El émbolo tiende a cabecear y el conjunto de la máquina se deforma. A menos, claro está, que sea especialmente rígida y —atención— relativamente pequeña. Por tanto, vale la pena moderar nuestras expectativas y escoger un tamaño más bien reducido, si no queremos encontrarnos luego con un funcionamiento deficiente.

Otro aspecto importante es que debemos olvidarnos de construir una máquina universal. La fenomenología geológica es tan diversa y abarca tantos órdenes de magnitud que es imposible diseñar un dispositivo que nos permita reproducirlos todos. Nos centraremos, pues, en dos propuestas experimentales, que nos permi-

*** El experimento**

Construiremos dos simuladores de fenómenos tectónicos. Aprenderemos a modelizar las estructuras geológicas que observamos en la naturaleza y desarrollaremos nuestras habilidades constructivas.

*** Materiales**

Listones de madera
Placas de metacrilato
Espigas roscadas
Tornillos
Sal común
Tamices
Colador
Pigmentos minerales
Sierra eléctrica
Taladro
Tacos de madera
Globo
Hoja de papel de lija

*** Precio aproximado**

Entre 50 y 100 euros (según el tamaño de los aparatos construidos).

*** Tiempo**

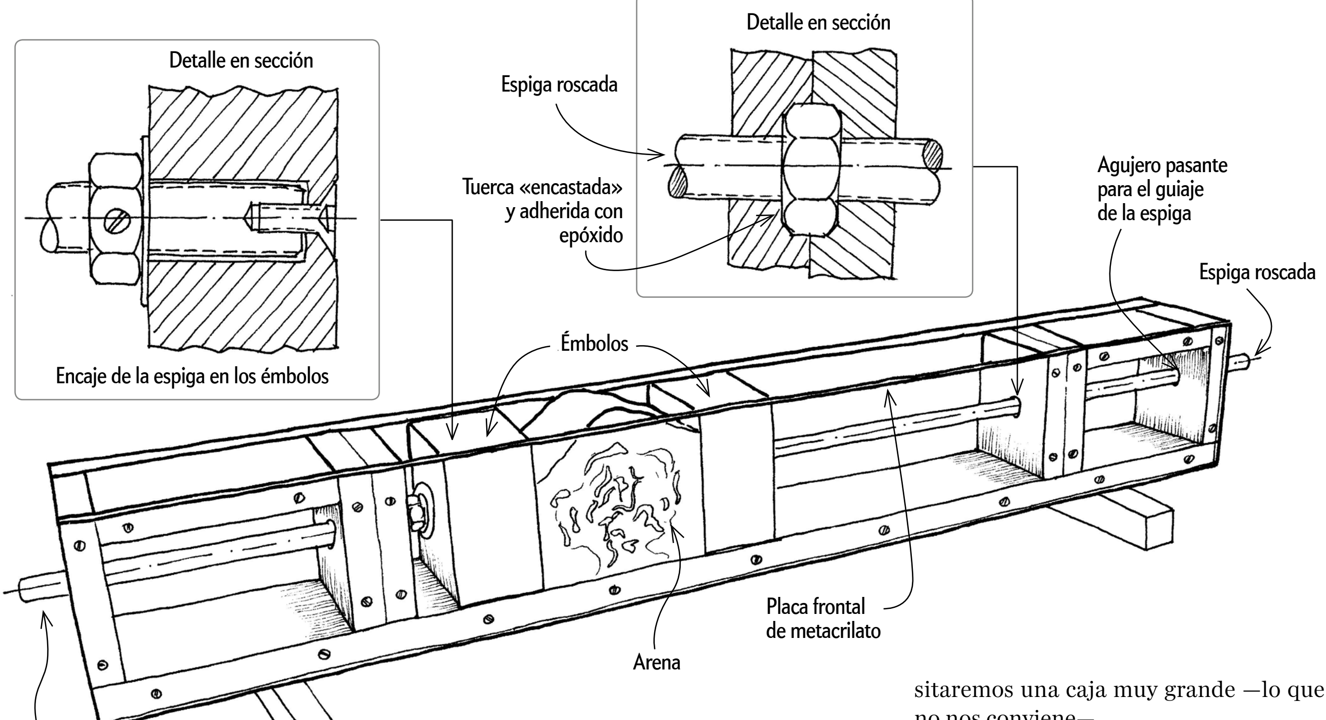
Construcción de uno de los aparatos: una jornada
Fase experimental: horas o días (según el número de simulaciones)

CORTESÍA DE MANUEL IGNACIO DE PAZ, GEOLOGYPICS.WORDPRESS.COM



EL CILINDRO DE MARBORÉ, en el macizo pirenaico de Monte Perdido, ofrece una espectacular muestra de pliegues y cabalgamientos formados durante la orogenia Alpina.

**Caja para la observación de secciones**




tirán observar los fenómenos tectónicos desde dos puntos de vista: las secciones y la superficie.

**Aparato I: Observación de secciones**

Empecemos por el aparato «fácil». Observemos el primer dibujo (*Caja para la observación de secciones*): una caja de madera, larga y esbelta, con la cara frontal cerrada con una placa de metacrilato bastante gruesa. El espacio de experimentación (la distancia que separa los dos émbolos, más sus dimensiones en sección) es de 330 milímetros de largo, 90 de altura y 75 de fondo. A ello hay que sumar dos espacios más, uno en cada extremo, que garantizan un movimiento lineal de los dos tornillos de presión, siendo el diámetro de estos últimos de 16 milímetros. El movimiento de los dos émbolos se consigue acoplando un taladro en el extremo libre de los tornillos.

Encontraremos todo el material necesario (las tablas de madera, de pino, y todo lo demás) en una tienda de bricolaje. (Si bien este aparato puede modificarse en función de los materiales que tengamos a mano, deberemos tener en cuenta que los espesores de la estructura son notables, que los émbolos son muy anchos, que la rosca es muy grande y que, al pasar a través de dos paredes, queda perfectamente alineada con el eje del aparato, sin que en principio las deformaciones puedan afectarle.)

Finalmente, prestemos atención a la cavidad: es poco profunda, más bien estrecha y pensada para observar cortes geológicos. Ello es importantísimo para que no debamos ejercer una fuerza excesiva. Veamos por qué.

Con la máquina ya construida, empieza una fase de experimentación en la que nos asalta un nuevo reto: ¿con qué material vamos a experimentar? Históricamente se han utilizado tortas de arcilla, arena, harina, yeso en polvo, líquidos muy viscosos, perdigones o, como antes decíamos, láminas de espuma e incluso alpiste. Naturalmente, cada material tiene su propio comportamiento y, por tanto, su rango de aplicación. Pero no deben preocuparnos solo las propiedades físicas. También tenemos que ser pragmáticos. Así que escogeremos un material capaz de tomar diversos colores y de producir estratos finos, pero también barato y fácil de encontrar.

Si utilizamos un material con una granulometría muy gruesa (bolitas de poliestireno expandido o alpiste), su ligereza y baja fricción interna nos pueden simplificar las cosas. Sin embargo, deberemos trabajar con capas muy espesas para que queden bien marcadas y, por tanto, necesitaremos una caja muy grande —lo que no nos conviene—.

Por suerte, hay un material que cumple con todos nuestros requisitos: la sal de cocina. Nos proveeremos, pues, de unos kilos de sal común, de la más fina, y la tamizaremos a fondo para separar y reservar las distintas granulometrías que la componen.

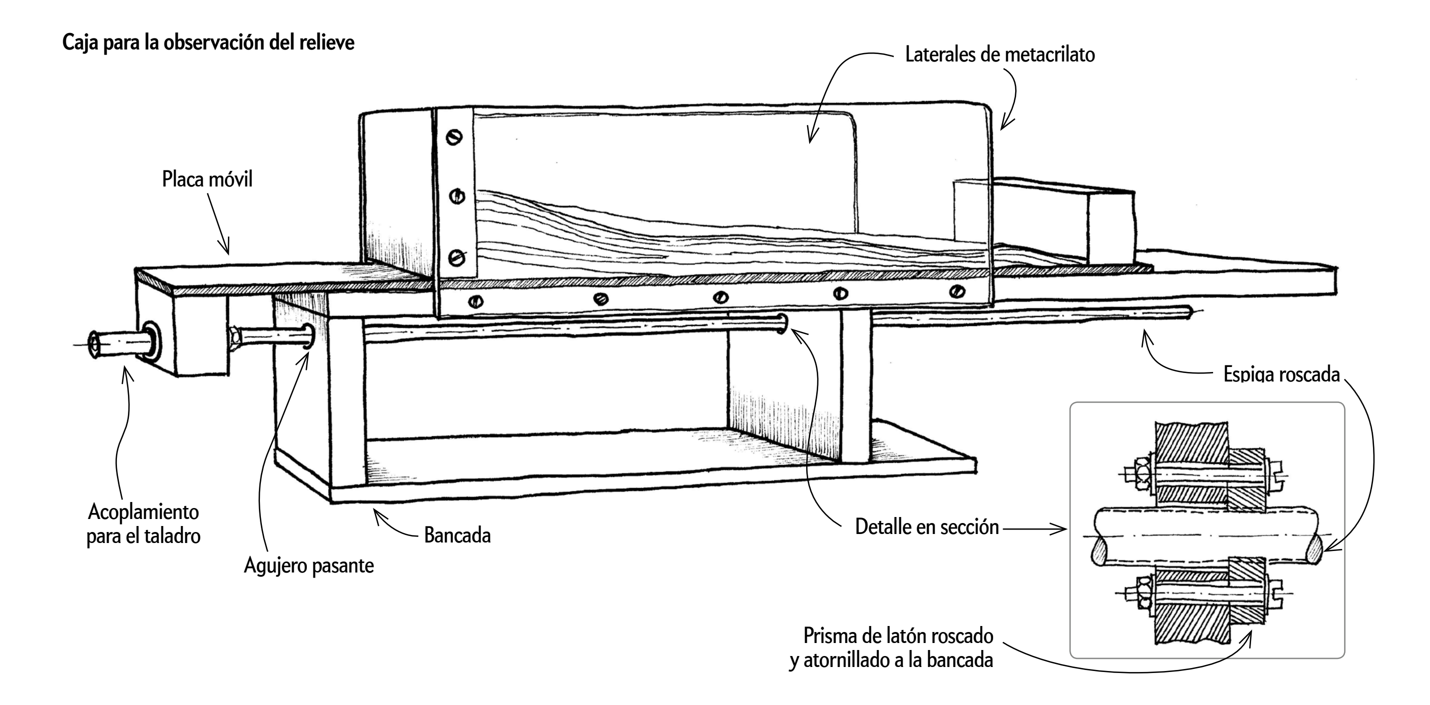
Luego, a las distintas fracciones añadiremos pigmentos minerales para colorearlas (los encontraremos en tiendas de construcción o de bellas artes). Finalmente, mediante un pequeño colador, esparciremos en el interior de la caja de experimentación las fracciones coloreadas. De vez en cuando aplicaremos una fina capa de sal sin colorear, que marcará los planos de estratificación.

Con todo a punto, acoplaremos el taladro en uno de los tornillos y procederemos a comprimir lentamente las capas de sal. El fenómeno es muy interesante: los estratos se deslizan sobre la base, se engrosan y deforman, apareciendo pliegues y cabalgamientos (*1a* y *1b*). La sal funciona bien porque presenta cierta cohesión interna (siempre está húmeda), pero también se desliza sobre sí misma con cierta facilidad, especialmente si está coloreada, ya que el polvillo tintóreo envuelve los granos, lubricando el contacto entre estos.

Como ya dijimos más arriba, conforme el proceso avanza topamos con mayor resistencia mecánica y debemos aplicar más fuerza. Si queremos un funcionamiento

MARC BOADA FERRER

Caja para la observación del relieve




suave y regular, no tendremos más remedio que reducir el espesor de la cámara de experimentación. Es decir, cuanto más delgadas sean las secciones geológicas, mejor.

Pero ello también tiene inconvenientes. Trabajar con una sección tan estrecha impide observar una parte no menos interesante de la tectónica: la superficie. Los pliegues, fallas y discontinuidades tienen un reflejo en la superficie, el relieve, cuya observación es también interesante. Por ello proponemos la construcción de un segundo dispositivo.

### Aparato II: Observación del relieve

En esta ocasión, la razón de aspecto de nuestro espacio de experimentación será muy distinta. El segundo artefacto será, en planta, bastante más amplio (de las dimensiones de un DIN A4) pero mucho más bajo, de forma que se conserven las proporciones del instrumento preliminar —que sabemos que funciona—.

En el primer aparato hemos comprobado que el émbolo puede movilizar sedimento en una cavidad con una superficie (en sección vertical) de unos 70 centímetros cuadrados. Aplicaremos a nuestro nuevo dispositivo esa misma magnitud. Teniendo en cuenta que el ancho será de 21 centímetros, trabajaremos con un paquete de sal de 3 o 4 centímetros de espesor. Ello nos obligará a disponer capas muy finas de material perfectamente tamizado. El resultado, eso sí, será espectacular. Al comprimir el sedimento, aparecen deformaciones superficiales interesantísimas, que reproducen a la perfección las cordilleras externas de sistemas compresivos como los Pirineos, por citar un ejemplo.

Una segunda diferencia de este instrumento respecto del anterior es que el desplazamiento del émbolo se produce junto con el de la base de la cavidad. Ello permite simular movimientos tectónicos en los que participa un sustrato activo.

Miremos el segundo dibujo (*Caja para la observación del relieve*). Observemos que, sobre una bancada rígida diseñada para fijarse con un par de sargentos a una mesa, se desliza una placa de madera que por un lado es solidaria al tornillo de







MARC BOADA FERRER










presión y por el otro tiene un listón que cumple las funciones de émbolo. En el otro extremo del espacio de experimentación hay un mamparo vertical estático, por debajo del cual se desliza la placa móvil.

Veamos ahora algunas de las simulaciones que podemos llevar a cabo con nuestros dos aparatos. Lo mejor es empezar con pruebas sencillas; el propósito es desarrollar la pericia necesaria para otras más complejas.

**Colisión de dos continentes.** En el aparato para la observación de secciones colocaremos dos paquetes de sedimentos de granulometría ligeramente distinta, uno a cada lado del espacio de experimentación. Mediante el acercamiento de los dos émbolos, entrarán en colisión (*2a* y *2b*).

**Clivaje de pizarras**. En el instrumento para la observación de secciones, colocaremos los dos émbolos relativamente cerca. Llenaremos la caja con capas perfectamente paralelas. Tras someterlas a presión, las figuras obtenidas guardan un parecido increíble con las estructuras reales (*3*).

**Subducción.** En el segundo aparato, el más ancho y con la base móvil, pegaremos sobre esta una hoja de papel de lija. Ello nos permitirá reproducir el arrastre de las capas producido por el zócalo continental en movimiento (*4*). A este efecto podemos superponer la presión del pistón o solo la de la masa de sedimentos contra el mamparo; el resultado será sustancialmente distinto, ya que a la elevación que sufre el sedimento al colisionar con el mamparo se suma una segunda fase de compresión inducida por el pistón y, por tanto, aparece una complejidad tectónica similar a la de algunos afloramientos de los sistemas alpinos.

**Cabalgamiento**. En la máquina para la observación de secciones, dispongamos entre los sedimentos una hoja de papel fino. Simularemos un plano de deslizamiento a partir del cual resulta muy fácil lograr un cabalgamiento (*5*).

Superadas estas primeras pruebas, podemos embarcarnos en procesos más complejos.

**Falla.** En el aparato para la observación de secciones, pongamos un taco en forma de cuña ante el émbolo y desplacemos este. O, aún más interesante, pongamos dos tacos y entre ellos otro de forma trapezoidal y separemos los émbolos. El resultado será una falla perfecta en todos sus detalles.

**Cizallamiento.** Para estudiar los desplazamientos horizontales y antagonistas de dos masas, utilizaremos el segundo aparato, el más ancho. Le añadiremos dos bloques de madera que comprimirán el sustrato. Se generará así un campo de grietas ortogonales que responden a los esfuerzos de cizalla.

**Movimientos verticales**. En el aparato para la observación de secciones coloquemos un globo deshinchado bajo el sustrato e interpongamos una fina lámina de plástico. Luego hinchemos el globo a través de la base, donde habremos practicado un agujero. Observaremos la formación de estructuras anticlinales. Si repetimos el proceso, pero al revés, veremos la formación de las formas sinclinales. En el segundo aparato, podremos ver estructuras de colapso, como calderas volcánicas y dolinas.

Así, poco a poco, utilizando toda nuestra imaginación, conseguiremos reproducir una parte sustancial de las principales estructuras tectónicas de una forma tan visual y sugerente que sin duda nuestros alumnos quedarán fascinados.

**EN NUESTRO ARCHIVO**

Geotectónica de los Pirineos. Antonio Teixell en *IyC*, septiembre de 2000.

por Bartolo Luque

**Bartolo Luque** es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



# El billar como computador analógico

## Cómo calcular el máximo común divisor de dos números, sobrevivir en *La jungla de cristal* y obtener los decimales del número pi empleando un billar

GETTY IMAGES/BABUSHKA_P90/ISTOCK

Las matemáticas y el billar han mantenido siempre una fructífera relación. En 1835, el ingeniero y matemático francés Gaspard-Gustave de Coriolis publicó el efecto que lo haría célebre y también su *Teoría matemática de los efectos en el juego del billar*, donde demostró por primera vez cómo había que golpear una bola para conseguir trayectorias parabólicas sobre la mesa de juego.

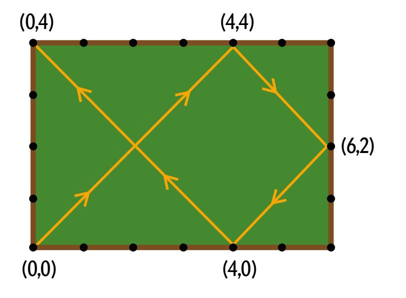
Pero no solo las matemáticas han hecho avanzar al billar; también ha ocurrido al revés. Por ejemplo, los modelos de billar de los matemáticos Yákov Sinái (una mesa con un disco de rebote en el centro) o de Leonid Bunimóvich (en forma de estadio olímpico) desempeñaron un papel relevante en el nacimiento de la disciplina del caos cuántico.

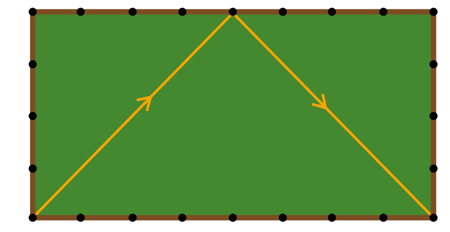
En las líneas que siguen exploraremos tres casos en los que usaremos una mesa de billar como máquina analógica de cómputo: una para calcular el máximo común divisor de dos números, otra para determinar trasvases de líquidos entre recipientes, y una última que nos permitirá obtener tantas cifras decimales como deseemos del número $\pi$.

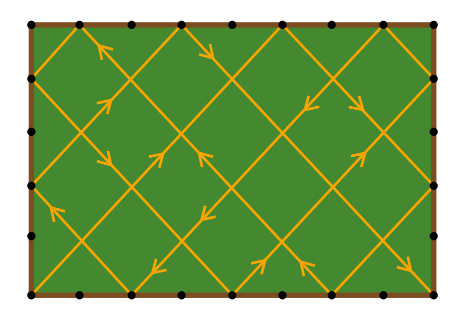
### El billar de Zavrotsky

En abril de 1961, el matemático venezolano Andrés Zavrotsky patentó un aparato óptico capaz de calcular el máximo común divisor de dos números. En su libro *El billar no es de vagos*, Carlos Bosch nos cuenta cómo podemos usar un billar para emular la máquina de cómputo analógico de Zavrotsky.

Supongamos que deseamos encontrar el máximo común divisor de 6 y 4. Para ello emplearemos una mesa de billar rectangular de dimensiones $6 \times 4$, a la que asignaremos coordenadas de tal modo que la esquina inferior izquierda coincida con el origen (0,0), como vemos en el primer diagrama de la figura 1. Tanto en este caso como en los que siguen, supondremos que todas las colisiones son





**1. TRES EJEMPLOS** de billares de Zavrotsky para calcular el máximo común divisor de dos números: (6, 4), (8, 4), y (8, 5), coincidentes en cada caso con las dimensiones de la mesa de billar. Los diagramas muestran las trayectorias completas de una bola que parte del vértice (0,0) con un ángulo de 45 grados.

perfectamente elásticas; es decir, sin rozamiento ni pérdidas de energía.

En este billar de Zavrotsky comenzaremos siempre golpeando la bola desde el origen con un ángulo de 45 grados. En nuestro ejemplo vemos que, después de tres rebotes, la bola alcanza uno de los vértices: el de coordenadas (0,4), donde supondremos que se detiene. En su camino, la bola ha rebotado en el eje $x$ en el punto (4,0). Y la mitad de la distancia de este punto al origen es 2: el máximo común divisor de 4 y 6. ¿Casualidad?

Veamos otro ejemplo. El segundo diagrama de la figura 1 nos muestra el cómputo analógico del máximo común divisor de 8 y 4 con una mesa de billar de tales dimensiones. Tras un solo rebote alcanzamos el primer vértice: el punto (8,0), que se halla en el eje $x$ a una distancia 8 del origen. Según nuestro algoritmo, el máximo común divisor ha de ser, por tanto, 8/2 = 4. ¡Correcto!

¿Cómo proceder si la trayectoria de la bola toca el eje $x$ en más de un punto? En tal caso, tomaremos el punto más cercano al origen para determinar la distancia. Por ejemplo, para una mesa de tamaño 8 × 5, como la del tercer diagrama de la figura 1, la trayectoria resulta mucho más tortuosa y la bola toca los puntos (6,0), (4,0), (2,0) y (8,0) del eje de abscisas. El más cercano al origen es (2,0), de modo que, según nuestro algoritmo, el máximo común divisor debería ser 2/2 = 1, lo que de nuevo es cierto.

¿Por qué funciona? En la esquina inferior izquierda de la figura 2 hemos representado una mesa de billar de dimensiones 2 × 3. Pintada en negro, vemos el primer tramo de la trayectoria de nuestra bola desde que parte del origen con un ángulo de 45 grados hasta que alcanza el primer punto de rebote, $P_1$ = (2,2). El siguiente tramo, en azul, nos conduce al segundo punto de rebote, $P_2$ = (3,1). Que a su vez nos lleva al último, $P_3$ = (2,0), a través del camino amarillo para alcanzar después el vértice final en (0,2). El algoritmo vuelve a acertar, porque 2/2 = 1 es el máximo común divisor de 2 y 3.

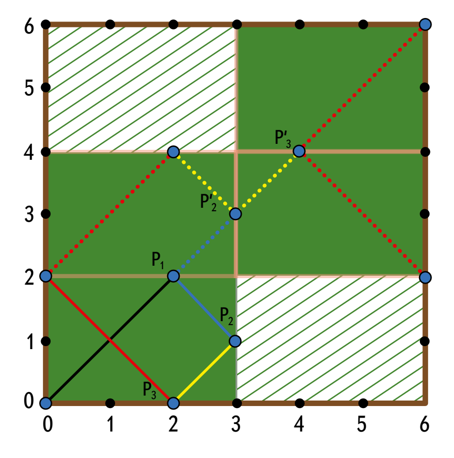
Antes de continuar, veamos primero que el recorrido de la bola también nos revela el mínimo común múltiplo de 2 y 3. Para cuando haya alcanzado un vértice, la trayectoria habrá recorrido un número entero $p$ de veces la distancia vertical. Esta es de longitud 2, por lo que los posibles valores totales de la distancia vertical recorrida serán 2, 4, 6, 8... Al mismo tiempo, habrá recorrido un número entero $q$ de veces la distancia horizontal. Dado que esta mide 3, los valores posibles de la distancia horizontal total serán 3, 6, 9, 12...

La bola se mueve siempre con una inclinación de 45 grados, por lo que, cuando acabe la trayectoria en un vértice, las distancias vertical y horizontal recorridas habrán de ser forzosamente iguales. En nuestro caso, eso ocurre para la primera distancia común, 6, que, efectivamente, es el mínimo común múltiplo de 2 y 3. Así que nos basta con contar el número de veces que la bola toca las bandas horizontales ($p$ = 3 en nuestro ejemplo) o las verticales ($q$ = 2) y multiplicarlo por la longitud respectiva: 3 × 2 = 2 × 3 = 6.

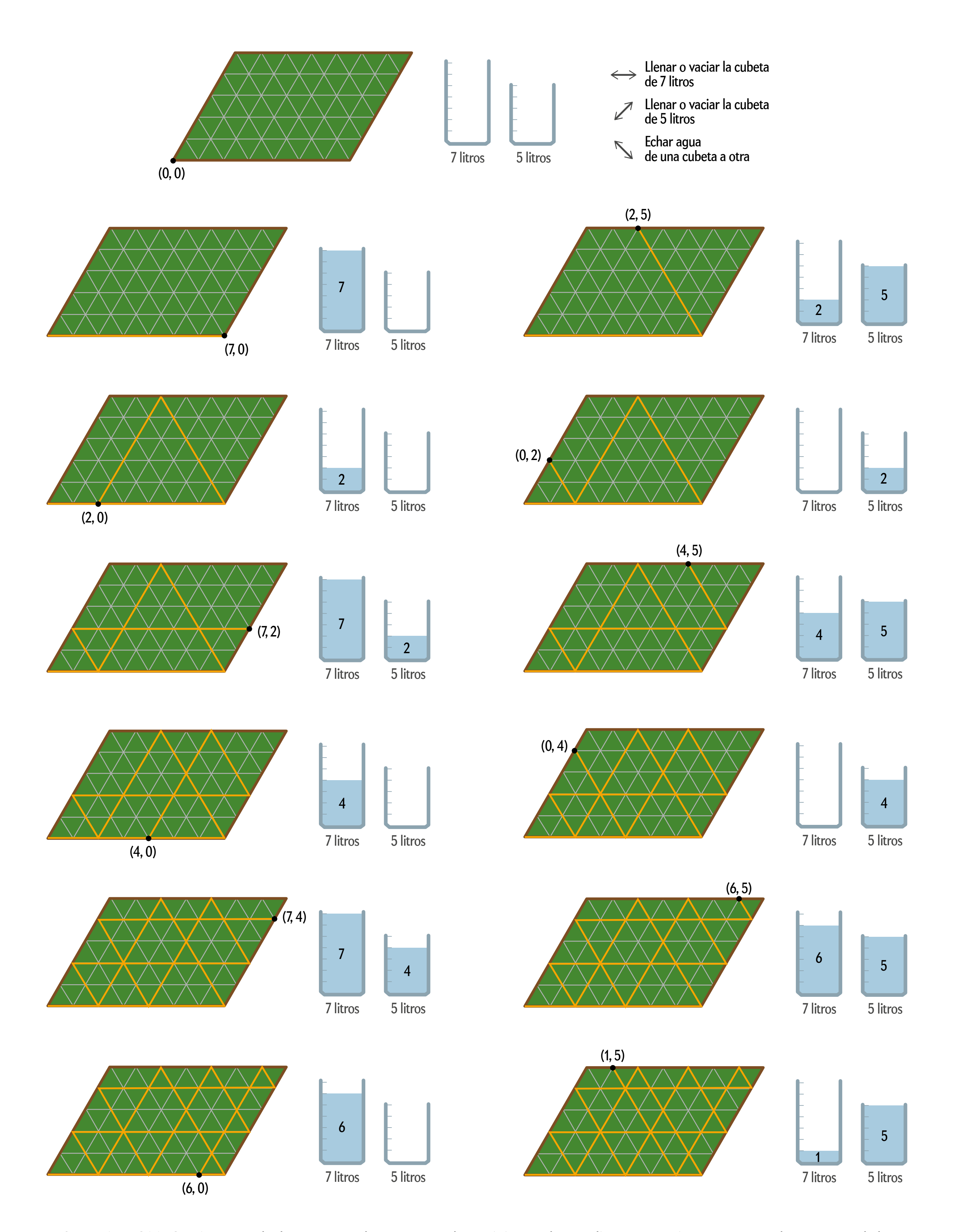
El razonamiento anterior nos permite calcular la distancia total recorrida por la bola, que es $\sqrt{6^2 + 6^2} = 6\sqrt{2}$, lo que nos insinúa que usemos un cuadrado de lado 6 para entender qué está sucediendo.

En la figura 2 hemos construido ese cuadrado a partir de la replicación de nuestro billar original. Si reflejamos nuestra mesa con respecto a su banda superior, donde se produce el primer rebote en $P_1$ = (2,2), el reflejo de la trayectoria azul empalma con la diagonal del cuadrado. Después podemos reflejar nuestra mesa virtual con respecto a su banda vertical derecha, donde se produce el segundo rebote en $P_2$ = (3,1), que ahora queda asociado al punto $P_2'$ = (3,3). Eso hace que la trayectoria amarilla empalme de nuevo con la diagonal del cuadrado, lo que nos lleva en nuestra segunda mesa virtual al tercer punto de rebote, $P_3'$ = (4,4), asociado al punto de rebote original $P_3$ = (2,0). Tras una última reflexión con respecto a la banda horizontal superior, el último trozo de la trayectoria, en rojo, empalma con la diagonal para alcanzar el vértice final (0,2), que ahora corresponde al vértice (6,6) del cuadrado.

Este método es totalmente general; nos falta ahora entender por qué funciona el algoritmo para encontrar el máximo común divisor. En el caso de una mesa de dimensiones $n \times m$, siempre podremos formar un cuadrado de dimensiones $nq \times mp$ con $q \times p$ rectángulos, donde $p/q$ es la fracción reducida de $n/m$ (en nuestro ejemplo, $n/m$ = 3/2 ya está reducida, de modo que $p/q$ = 3/2). Ahora, el lector puede comprobar que todos los puntos de rebote virtuales asociados a los originales de la banda horizontal inferior, que aparecen a lo largo de la diagonal, presentarán siempre distancias a sus respectivos orígenes virtuales de la forma $2am + 2bn$,




**2. «MESA VIRTUAL»** cuadrada asociada a un billar de Zavrotsky de dimensiones 3 × 2. La trayectoria de la bola original (*rectángulo inferior izquierdo*) puede reinterpretarse como una trayectoria a lo largo de la diagonal del cuadrado.




3. BILLAR ROMBOIDAL para calcular trasvases de agua entre dos recipientes de 7 y 5 litros, respectivamente. En cada momento de la trayectoria de la bola (*naranja*), las coordenadas de su posición indican la cantidad de agua contenida en cada uno de los recipientes.

donde $a$ y $b$ son números enteros. El corazón del algoritmo de Zavrotsky es un teorema de la teoría de números que nos asegura que el mínimo número posible de la forma $2am + 2bn$ es, justamente, dos veces el máximo común divisor de $n$ y $m$. ¿Ingenioso, verdad?

### *La jungla de cristal 3*

En la película *La jungla de cristal 3*, el terrorista Simon hace estallar una bomba en un concurrido centro comercial de Nueva York y después revela la existencia de más explosivos ocultos en la ciudad. El detective John McClane (Bruce Willis) y su acompañante Zeus (Samuel L. Jackson) tienen que desactivar una bomba que se encuentra en una fuente de un parque y que explotará en 5 minutos, a menos que obtengan exactamente 4 galones de agua usando solo dos garrafas sin graduar de 3 y 5 galones, respectivamente. Se trata de un problema clásico de matemática recreativa. Si no lo ha resuelto nunca, pruebe a hacerlo.

En su libro, Bosch nos ofrece un algoritmo de billar para solucionar este tipo de problemas. Ilustrémoslo con un caso algo más complicado que, probablemente, McClane y Zeus no hubieran solucionado en cinco minutos: obtener un litro de agua con dos garrafas no graduadas de 7 y 5 litros.

Para encontrar la solución, usaremos la capacidad de computación de un billar romboidal como el de la figura 3. Cada vértice del reticulado triangular, con coordenadas que denotaremos $(n,m)$, representa un posible estado de nuestros dos contenedores: $n$ litros en el contenedor de 7 (con $n = 0, 1, ..., 7$) y $m$ litros en el de 5 (con $m = 0, 1, ..., 5$). Así, comenzar con nuestra bola en el origen (0,0) resulta equivalente a empezar con ambos contenedores vacíos.

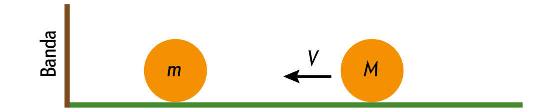
Los posibles trasvases de agua pueden «traducirse» en los movimientos de nuestra bola de acuerdo con las reglas indicadas en la figura 3. Si golpeamos nuestra bola siguiendo la banda horizontal inferior, alcanzaremos el primer punto de rebote, situado en (7,0), la esquina inferior derecha de nuestro billar. Esta trayectoria equivale a llenar con 7 litros nuestro primer contenedor.

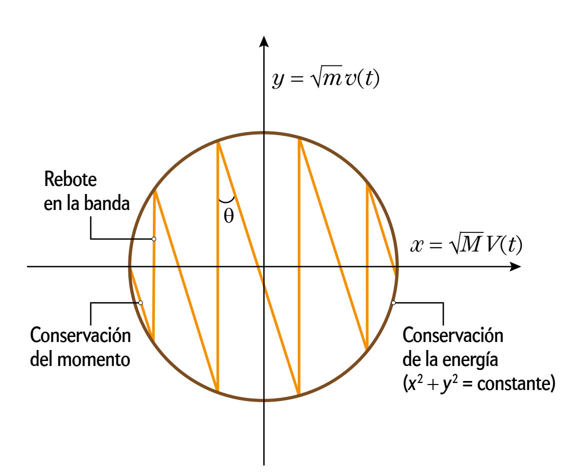
Ese primer rebote mandará nuestra bola al punto (2,5), que obtenemos vaciando 5 litros del primer contenedor en el segundo. El segundo rebote nos lleva al punto (2,0), lo que corresponde a vaciar el segundo contenedor. El tercero nos conduce a (0,2), equivalente a verter los dos litros del primer contenedor en el segundo. El cuarto nos lleva al punto (7,2), que alcanzamos llenando el primer contenedor. Los rebotes sucesivos nos conducen a (4,5), (4,0), (0,4), (7,4), (6,5), (6,0) y (1,5).

Este es el primer punto en el que una de las coordenadas toma el valor 1, lo que quiere decir que hemos conseguido nuestro objetivo: obtener exactamente un litro. El lector puede comprobar que, partiendo del origen pero golpeando primero hacia arriba, obtenemos una estrategia alternativa que acaba en (7,1).

La primera vez que vi este procedimiento, hace ya muchos años, fue en un ensayo de Martin Gardner titulado «Botes y rebotes en polígonos y poliedros». En él, Gardner escribía: «Con un poco de ingenio podemos desarrollar ordenadores de rebotes de bola para cualquier problema de medidas de líquidos en el que no intervengan más de tres vasijas» (¿se le ocurre al lector cómo incluir una tercera vasija en nuestro billar?). El texto continuaba explorando trayectorias cíclicas dentro de polígonos, cubos y tetraedros hasta hipercubos de cualquier dimensión.

Nuestro último cómputo de billar irá en sentido contrario: en vez de aumentar la dimensión de nuestro billar, la reduciremos a una y añadiremos tan solo una bola más. Estoy seguro de que el resultado habría maravillado al maestro Gardner.




**4. BILLAR DE GALPERIN** con dos bolas de masas $m \leq M$ (*arriba*) y su diagrama de fases (*abajo*), donde los ejes son proporcionales a la velocidad de las bolas en cada instante. Las líneas en zigzag indican el movimiento en el espacio de fases causado por los choques entre las bolas (*líneas inclinadas*) y por los choques de la bola de masa $m$ contra la pared (*líneas verticales*).

### Un billar para calcular π

En la figura 4 vemos el billar unidimensional que en 2003 propuso el matemático Gregory Galperin. Se trata de dos bolas con masas $m \leq M$ situadas sobre un billar unidimensional con una sola «banda» o pared; es decir, semiinfinito.

Para familiarizarnos con él, supongamos que las dos masas son iguales, $M = m$. Cuando la bola $M$ avanza a velocidad $V$ y golpea a la bola $m$ en reposo, le transfiere toda su energía y momento. De modo que la primera se detiene y la segunda comienza a avanzar a velocidad $v = V$ hasta rebotar en el origen, la única «banda» de nuestro billar. Después regresa con la misma velocidad, ahora cambiada de signo. Por último, vuelve a producirse un choque entre $m$ y $M$, el cual deja a $m$ en reposo en su posición inicial y hace que $M$ se aleje hacia el infinito con velocidad $V$. Observe que en todo el proceso se han producido un total de 3 choques.

Si, como hace el matemático Grant Sanderson en su fantástico canal de YouTube 3Blue1Brown, simuláramos en un ordenador qué ocurre para otros casos, veríamos algo más que curioso. Un lanzamiento con $M = 100m$ termina con un total de 31 choques. Uno con $M = 100^2m$, con 314 choques. Uno con $M = 100^3m$, con 3141. Y efectivamente, queridos lectores, si $M = 100^n m$, ¡la cantidad total de rebotes coincide en sus dígitos con los $n + 1$ primeros dígitos del π!

¿Por qué se produce esta inesperada aparición de π? Para verlo, recurriremos a una sencilla herramienta de la mecánica conocida como espacio de fases, o espacio de configuraciones, la cual nos permite transformar preguntas dinámicas en preguntas geométricas.

En los choques perfectamente elásticos se conservan la energía y el momento. Podemos expresar la conservación de la energía cinética de nuestro billar como

$$\frac{1}{2}\,mv^2(t) + \frac{1}{2}\,MV^2(t) = \text{cte}\ ,$$

donde las velocidades $v(t)$ y $V(t)$, asociadas respectivamente a las bolas de masas $m$ y $M$, variarán con el tiempo cada vez que se produzca un choque. Y, como apunta Grant Sanderson, si aparece el número $\pi$ es porque en algún sitio se oculta una circunferencia. ¿Dónde está?

Observemos que podemos reescribir la ecuación de la conservación de la energía como

$$(\sqrt{M}\,V(t))^2 + (\sqrt{m}\,v(t))^2 = \text{cte}'$$

En la figura 4 hemos representado el espacio de fases de nuestro sistema, donde hemos tomado como variables de los ejes:

$$x = \sqrt{M}\,V(t)\ ,$$
$$y = \sqrt{m}\,v(t)\ .$$

De esta manera, los posibles estados de nuestro billar corresponden a los puntos $(x,y)$ que se encuentran sobre la circunferencia de radio $\sqrt{\text{cte}'}$.

Todo lanzamiento comienza en $t = 0$ con la bola de masa $M$ dirigiéndose a velocidad $V(0)$ (negativa) hacia su compañera, parada con $v(0) = 0$. Tras la colisión, el punto $(\sqrt{M}\,V(0),0)$ se transformará en otro de la circunferencia. ¿En cuál?

Este último puede calcularse a partir de la conservación del momento total:

$$mv(t) + MV(t) = \text{cte}''\ ,$$

que, en coordenadas del espacio de fases, puede reescribirse como

$$y(t) = -\sqrt{\frac{M}{m}}\,x(t) + \frac{\text{cte}''}{\sqrt{m}}$$

Esta ecuación representa una recta. Es decir, la conservación del momento obliga a que los posibles puntos en el espacio de configuraciones, además de hallarse sobre una circunferencia, pertenezcan también a esta recta.

Nuestra recta corta la circunferencia en los puntos

$$(\sqrt{M}\,V(0)\ ,\ 0)\ ,$$
$$(\sqrt{M}\,V(t_1)\ ,\ \sqrt{m}\,v(t_1)).$$

Este último corresponde a las bolas de masas $M$ y $m$ moviéndose ambas hacia la banda del billar, y donde $t_1$ denota el instante en que se produce la primera colisión.

Cuando, en $t_2$, la bola $m$ rebota en la banda, su velocidad cambia de signo, de modo que nuestro sistema salta al punto

$$(x(t_2)\ ,\ y(t_2)) = (x(t_1)\ ,\ -y(t_1))\ ,$$

lo que supone una reflexión con respecto al eje $x$. A continuación se produce un nuevo choque entre las bolas y volvemos a recurrir a la recta de conservación del momento para hallar el siguiente punto, como podemos apreciar en la figura.

El zigzag se repite de la misma manera hasta que $0 < v(t) < V(t)$ y la bola de masa $M$ se aleja de la banda a mayor velocidad que la de masa $m$, en cuyo caso ya no se producirán más choques.

Observemos que las rectas verticales y las oblicuas forman siempre el mismo ángulo $\theta$. El teorema del ángulo inscrito nos asegura que las longitudes de todos los arcos entre los sucesivos puntos alcanzados por la dinámica son idénticos y valen $2\theta$ radianes. De modo que el número total de rebotes será el mayor $N$ que cumpla que $N2\theta < 2\pi$, o $N\theta < \pi$.

Por ejemplo, si $\theta = 0{,}001$, entonces $N$ valdrá 3141. Este es el máximo valor posible, ya que $3141 \times 0{,}001 = 3{,}141 < \pi$, mientras que para $N = 3142$ obtenemos $3142 \times 0{,}001 = 3{,}142 > \pi$. Por tanto, las bolas no vuelven a colisionar después del choque 3141.

Como consecuencia de lo anterior, si nuestro ángulo toma el valor $\theta = 10^{-n}$, obtendremos un número $N$ de rebotes que coincidirá con los primeros $n + 1$ dígitos de $\pi$. ¿Cómo nos aseguramos de que el ángulo sea precisamente ese con las masas de nuestras bolas? Observemos que

$$\theta = \arctan(\sqrt{m/M})$$

y recordemos que la función $\arctan(x)$ puede aproximarse por $x$ cuando $x$ es pequeño. De modo que si tomamos $M = 10^{2n}m$ obtendremos justamente lo que deseamos: $\theta = \arctan(10^{-n}) \approx 10^{-n}$. ¡Sorprendente!


PARA SABER MÁS

**Botes y rebotes en polígonos y poliedros.** Martin Gardner en *Comunicación extraterrestre y otros pasatiempos matemáticos*. Cátedra, 1987.

**Playing pool with π (the number π from a billiard point of view).** Gregory Galperin en *Regular and Chaotic Dynamics*, vol. 8, págs. 375-394, 2003.

**El billar no es de vagos: Ciencia, juego y diversión.** Carlos Bosch. Fondo de Cultura Económica, 2009.

**Why do colliding blocks compute pi?** Grant Sanderson en 3Blue1Brown, www.youtube.com/watch?v=jsYwFizhncE. 20 de enero de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

**Caos en la escala cuántica.** Mason A. Porter y Richard L. Liboff en *IyC*, abril de 2003.



MÁS DE 140 PREMIOS NÓBEL
han explicado sus hallazgos en
Investigación y Ciencia
ALFR. NOBEL
NAT. MDCCC XXXIII OB. MDCCC XCVI
®© THE NOBEL FOUNDATION
Descubre todos los artículos en
www.investigacionyciencia.es/nobel




**PETROCALIPSIS**
CRISIS ENERGÉTICA GLOBAL
Y CÓMO (NO) LA VAMOS A SOLUCIONAR
Antonio Turiel
Alfabeto, 2020
216 págs.

# Por qué deberíamos imaginar un mundo sin petróleo

*Una invitación a reflexionar sobre algo de lo que no se habla tanto como se debiera*

Si hay algo que caracteriza el modo de vida de nuestra sociedad es su dependencia de fuentes de energía fiables y económicas. Todas las actividades que realizamos y todo lo que producimos, el fundamento y el motor de nuestro sistema económico, requieren grandes cantidades de energía. ¿De dónde viene hoy esa energía? De los combustibles fósiles, que en la actualidad suministran el 86 por ciento de toda la energía primaria que se consume en el mundo, además de proporcionarnos numerosos productos muy presentes en nuestro día a día, como los plásticos. Estos compuestos orgánicos, caracterizados por poseer una gran densidad energética (un kilogramo de diésel proporciona unos 11.700 vatios durante una hora) son los que han posibilitado el enorme nivel de desarrollo alcanzado por nuestra sociedad y los que permiten el estilo de vida que conocemos.

Nuestra gran dependencia de los combustibles fósiles, como el petróleo, «la sangre que corre por las venas de nuestra civilización», en palabras del autor del libro objeto de esta reseña, hace difícil que podamos imaginarnos siquiera cómo sería nuestro mundo sin él. Antonio Turiel, doctor en física e investigador del Instituto de Ciencias del Mar del CSIC que lleva desde 2010 divulgando desde su blog *The Oil Crash* sobre el pico de petróleo (el momento en el cual la producción de petróleo llega a su máximo histórico y a partir de ahí comienza a disminuir), analiza en este ensayo las posibles alternativas a nuestra dependencia del petróleo y sus derivados. Con un lenguaje claro y accesible para el público general, el autor aborda todos los temas relevantes que giran en torno a nuestro sistema energético actual y sus posibles alternativas. A lo largo de 23 capítulos, breves pero muy bien argumentados, Turiel proporciona cifras clave y nos explica de forma concisa pero contundente por qué las alternativas energéticas que se están planteando en la actualidad no podrán cubrir toda la energía que proporciona el petróleo, y por qué, de no aplicar cambios profundos en nuestro sistema económico y social, nos encaminamos a un escenario de descenso energético, el *petrocalipsis*, que tendrá calamitosas consecuencias para nuestras sociedades [*véase* «Los límites del crecimiento tras el cenit del petróleo», por Charles A. S. Hall y John W. Day; Investigación y Ciencia, octubre de 2009].

**Estamos poniendo el foco en algo que difícilmente va a ocurrir: seguir como hasta ahora sin más que cambiar unas fuentes de energía (fósiles) por otras (renovables)**

Una de las principales virtudes del libro es su sencillez. El autor ha realizado un gran esfuerzo para explicar de una manera entendible por todo el mundo cuestiones de gran complejidad. Para ello ha optado por no emplear tecnicismos, infografías, gráficas ni tablas, algo nada habitual cuando hablamos de asuntos como las tendencias y previsiones en la producción y consumo de petróleo y otras fuentes de energía, o cuando explicamos cómo se obtienen los hidrocarburos mediante técnicas como la fracturación hidráulica, o *fracking*. En un principio comencé a leer el libro con cierto escepticismo, pensando en que fracasaría en su intento, pero he de reconocer mi error. Es más, los capítulos son tan cortos, el lenguaje resulta tan entendible —hasta ameno— y los argumentos tan convincentes que el libro invita a leer un capítulo tras otro buscando respuestas al siguiente *por qué no* (por qué otras fuentes de energía no podrán sustituir por completo al petróleo) como si de una novela se tratara.

Resulta también muy acertado haber incluido una discusión sobre lo que necesitaríamos hacer para evitar el *petrocalipsis*: avanzar en la construcción de un sistema económico y social que no esté basado en el crecimiento continuo [*véanse* «El fin del crecimiento», por Bill McKibben; Investigación y Ciencia, junio de 2010; *y* «Decrecimiento energético», por Carles Riba Romeva; Investigación y Ciencia, enero de 2012]. Otro acierto del libro es que su sencillez no viene reñida con el rigor, ya que incluye numerosos datos que dan solidez a sus argumentos y una bibliografía seleccionada que los lectores podrán emplear para profundizar en diversas cuestiones.

Como bien dice el autor en el prólogo, este es un libro del «no», y los lectores no encontrarán en sus páginas mucha información que invite al optimismo, más bien todo lo contrario. En mi caso, su lectura me dejó algo de zozobra nada más terminarlo. Pero esa zozobra, ciertamente alentadora de la reflexión, es también necesaria para conocer mejor y tomar conciencia sobre la magnitud del problema al que nos enfrentamos y sobre lo difícil que será resolverlo en el marco de nuestro sistema social y económico.

Paradójicamente, quizá la principal virtud del libro (su sencillez) sea también uno de sus pocos defectos, ya que creo que varios lectores (entre quienes me incluyo) hubieran deseado un tratamiento con algo más de profundidad de algunas cuestiones. Y aunque no es algo que se estile en un ensayo de esta naturaleza, he echado en falta un índice alfabético que facilite la consulta de conceptos concretos. Una adición interesante para futuras ediciones sería poder contar con una serie

de tablas que, al final de cada capítulo o del propio libro, compilen las principales cifras que aparecen a lo largo del texto y las referencias bibliográficas de las que provienen, algo que sin duda agradecerán estudiosos y profesionales de la energía, el entorno natural y el desarrollo sostenible. Ello otorgaría un valor añadido a esta obra sin que por ello perdiese un ápice de legibilidad e interés para los lectores no especialistas.

*Petrocalipsis* es un libro muy actual y recomendable para todo aquel interesado en el medioambiente, la energía, la sostenibilidad, la transición ecológica y la reducción de nuestro impacto sobre el planeta. La obra adquiere especial importancia en un momento en el que la descarbonización de la economía y las energías renovables ocupan un lugar clave en la agenda política y económica, ya que nos muestra que estamos poniendo el foco en algo que difícilmente va a ocurrir: seguir como hasta ahora sin más que cambiar unas fuentes de energía (fósiles) por otras (renovables). El libro invita a reflexionar sobre algo de lo que no se habla en los medios de comunicación y en las discusiones políticas tanto como debiera: cómo va a ser nuestro sistema social y económico en un mundo sin petróleo abundante y barato. O, en otras palabras, un mundo sin tanta energía disponible para nuestro uso y disfrute.

Evitar el *petrocalipsis* no será fácil ni rápido. Pero hacerlo será imperioso para garantizar el bienestar de las generaciones futuras y la supervivencia de nuestras sociedades. No es posible mantener un crecimiento económico continuo cuando los recursos que lo sustentan son finitos. Por lo que, como bien reflexiona el autor, «no existe solución al problema porque estamos intentando resolver el problema equivocado». ¿Nos ponemos, pues, a intentar resolver el problema correcto?

*—Fernando T. Maestre*
*Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio Ramon Margalef*
*Universidad de Alicante*




**EL PAÍS DE LOS SUEÑOS PERDIDOS**
HISTORIA DE LA CIENCIA EN ESPAÑA
José Manuel Sánchez Ron
Taurus, 2020
1152 págs.

## *Totius in verba*

*Una historia enciclopédica de la ciencia en España*

José Manuel Sánchez Ron, seguramente el historiador de la ciencia más conocido del país y quizás el más prolijo, ha hecho un libro de libros, una historia de la ciencia española presentada como la más ambiciosa en su género. Si atendemos a su volumen, lo es: 1150 páginas que comprenden desde las *Etimologías* de san Isidoro de Sevilla hasta la creación en 1986 de la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva. Un repertorio que trata de ofrecer un panorama sistemático y exhaustivo de los protagonistas, las empresas y las instituciones vinculadas a la ciencia en nuestro país, aunque tampoco renuncia a explicar Copérnico, Galileo, Newton y la Revolución Científica, Lavoisier y la química moderna, el darwinismo, Einstein y la física cuántica.

Imposible resumir sus contenidos; sería más sencillo —tal vez revelador, pero absurdo— mencionar qué deja fuera. Se trata de un repaso formidable de épocas, personajes y empresas muy diversos, desde los manuales de navegación de la España imperial hasta el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. El esfuerzo es colosal, al alcance de un ejército de historiadores y no de uno solo. Querer contarlo todo es algo digno de admiración, un deseo muy ambicioso y tal vez impropio de la era digital. *El país de los sueños perdidos* es un libro de consulta que debería estar en todas las bibliotecas, aunque quizá sería optimista calificarlo como un libro de alta divulgación. No creo que en España un lector medio se interne en los pormenores sobre los porcentajes de artículos científicos en el Boletín de la Institución Libre de Enseñanza, las opiniones de Lora Tamayo sobre la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica, o el número de adhesiones de profesores y catedráticos de la universidad española que recibió la creación de la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas. Sánchez Ron cita de corrido a 27 de los 57 catedráticos que pidieron mejoras en sus salarios y más apoyo para sus laboratorios. Quiere registrarlo todo. Reproduce largas cartas y documentos administrativos, reales decretos, leyes, manifiestos. El lector a menudo queda sepultado, abrumado ante el torrente de información.

Ciertamente, y contra las versiones más estereotipadas de la leyenda negra, en España siempre hubo ciencia, aunque España no fuera España ni la ciencia lo que hoy entendemos por ciencia. Sin embargo, no encontrará aquí el lector disquisiciones historiográficas sobre unos sujetos y objetos que se presentan bastante compactos a través del tiempo. Sánchez Ron cuenta los hechos, sin problematizar categorías o procesos. Entre sus referencias habituales figuran Miguel Artola, Jordi Nadal, José María López Piñero y Joan Vernet, historiadores venerables todos, o el propio Antonio Domínguez Ortiz, el gran modernista cuyo último éxito editorial en Marcial Pons se tituló precisamente *España, tres milenios de historia*.

Así ocurre incluso entre nuestras mejores cabezas: el tiempo apenas transcurre para ellas. Eran clásicos ya hace casi medio siglo, pero ¿qué es eso para un país trimilenario? España tiene sus ritmos, a veces geológicos. Se puede invocar a los *Annales* como signo de renovación un siglo después. De hecho, apelar a la escuela fundada en 1929 por Lucien Febvre y Marc Bloch como un gesto de modernidad era algo habitual en la universidad española en la década de 1980. Nuestro autor

dice acogerse a este legado para, más adelante, señalar la falta de renovación e internacionalización en las matemáticas o las ciencias físicas en el siglo XIX, disciplinas llenas de «figuras intermedias» y «carentes de originalidad», por emplear su terminología.

Por la misma ecuación, se echa en falta alguna referencia o un poco de diálogo con Janet Browne para pensar a Darwin y el darwinismo, a Simon Schaffer o Mordechai Feingold para hablar de Newton y el newtonismo, a Peter Galison para discutir a Einstein, o a Mario Biagioli para entender a Galileo. Ni rastro de Lorraine Daston, Stephen Shapin, Donna Haraway o Bruno Latour. La historia de la ciencia que se ha hecho en los últimos cuarenta años en las universidades y los centros de investigación más punteros del mundo, de Harvard al Max Planck, pasando por Cambridge o la École de Hautes Études en Sciences Sociales de París, discurre inadvertida en esta compilación, desafiando el tiempo, el vocabulario y el tipo de problemas y enfoques que pueblan las publicaciones de este campo en todo el mundo.

Pero Sánchez Ron no suele detenerse en esos nuevos temas y enfoques (la construcción social de las evidencias y la circulación del conocimiento, los públicos de la ciencia, la epistemología histórica y la problemática historia de la objetividad, los aspectos materiales del conocimiento y un largo etcétera). En cierta ocasión, López Piñero, el padre de los estudios históricos de la ciencia en España, cargó contra Thomas Kuhn, la estructura de las revoluciones científicas y los paradigmas. El gran maestro también abjuraba de Foucault, que a su juicio solo había arrojado palabrería al conocimiento del pasado. Algo de esta aversión a la teoría y esta enajenación con respecto a las corrientes internacionales han marcado de hecho la ciencia y muchas disciplinas en España, entre ellas la historia de la ciencia.

¿Es por ello poco valiosa la obra de López Piñero? En absoluto. El historiador valenciano realizó una tarea erudita, apasionada y pedagógica única, de proporciones titánicas. Poco después de que en Estados Unidos Charles Gillispie dirigiera el colosal *Scientific biography dictionary* (16 volúmenes, 1970-1980), López Piñero y otros pioneros de la historia de la ciencia española (Glick, Navarro, Portela) hicieron el más modesto pero fundamental *Diccionario histórico de la ciencia moderna en España* (2 volúmenes, 1983). López Piñero exhumó e investigó tantos temas y figuras que su obra es la piedra miliar de la historia de la ciencia española.

Sánchez Ron es heredero de esta forma de hacer historia. Su obra sufre las mismas limitaciones, pero también posee los mismos méritos. La suya es una narrativa tradicional, de un positivismo tal vez extemporáneo pero radical y coherente. Lo es con su trayectoria y su trabajo, a los que de alguna manera rinde homenaje, pues muchas partes del libro reseñado proceden de *Cincel, martillo y piedra*, su historia de la ciencia española de los siglos XIX y XX, publicada en 1999 y prolongada aquí hasta las mil páginas. Sánchez Ron es fiel a su *atelier* (que diría un historiador de los *Annales*, precisamente). Con esas herramientas y ese método realizó sus trabajos ya clásicos sobre los físicos Blas Cabrera o Miguel Catalán, incorporados en este libro.

**Ciertamente, y contra las versiones más estereotipadas de la leyenda negra, en España siempre hubo ciencia, aunque España no fuera España ni la ciencia lo que hoy entendemos por ciencia**

Lo mismo puede decirse de Echegaray, Rey Pastor y las matemáticas, Esteban Terrada y la aeronáutica, o Torres Quevedo y la automática y la ingeniería. Sánchez Ron ha dejado su sello en tantos temas, la mayoría relacionados con las matemáticas y las ciencias de la materia en la Edad Contemporánea, que se ha convertido por derecho propio en un clásico de la disciplina, algo que se puede decir de pocos historiadores (y de casi ninguno vivo). Sus extensos conocimientos resultan superlativos en el ámbito de la física, no en vano su formación originaria. Doctor en física por el University College de Londres, obtuvo su plaza de titular en la universidad española en un departamento de física teórica. Después reorientó su carrera hacia la historia de la ciencia. Y con gran éxito: cátedras, libros, congresos, exposiciones, premios nacionales, academias, comités editoriales, fundaciones.

Sánchez Ron ha realizado una labor magnífica en al menos tres ámbitos: en la investigación propiamente dicha (cualquiera que se acerque a las matemáticas, la física y la ingeniería españolas contemporáneas pasará por su trabajo de manera obligatoria), en la implantación institucional de la disciplina (ha llevado la historia de la ciencia a la Real Academia Española y a los medios) y finalmente en la popularización de la misma. Así como Juan Luis Arsuaga hace hoy pareja con Juan José Millás, José Manuel Sánchez Ron, que ha escrito varios y buenos libros de divulgación, firmó uno en colaboración con Mingote y bien podría haberlo firmado con Forges, otro genio del dibujo muy sensibilizado con la ciencia. No le ha hecho ascos a ningún foro y en todos ha esgrimido el mismo repertorio de erudición, *fair play*, curiosidad inagotable y compromiso con la ciencia.

Hay otras formas de hacer historia, no obstante. En este libro, por ejemplo, Mutis aparece retratado en función de Linneo y de su papel como introductor de la astronomía copernicana en Nueva Granada. Daniela Bleichmar, en cambio, optó por estudiar la riqueza iconográfica y el lenguaje visual de la *Flora de Bogotá* (*Visible Empire*; Chicago University Press, 2012). Otro ejemplo: como muchos demócratas, Sánchez Ron ha tendido a rebajar la intensidad de las relaciones entre la ciencia y el franquismo. Las dictaduras son malas y la ciencia suele ser positiva, venía a ser el silogismo (muy simplificado, Sánchez Ron ha escrito con Ana Romero las mejores y más informadas páginas sobre la energía nuclear en España). Lino Camprubí, sin embargo, deslizaba que quienes afirman que no hubo investigación en el franquismo obtuvieron su cátedra entonces —no es el caso de Sánchez Ron, que conste—, levantando a continuación un fresco novedoso de las relaciones entre la ciencia, el nacionalcatolicismo, el Instituto Nacional de Industria y el CSIC (*Los ingenieros de Franco*; Crítica, 2017) [*véase* «Los científicos e ingenieros de Franco», por Lino Camprubí; Investigación y Ciencia, diciembre de 2017]. Ni hecha por ángeles ni por demonios, resulta que la ciencia es una actividad humana. Tiene efectos liberadores, es un referente de

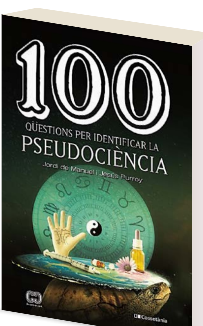
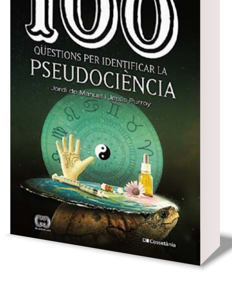
valores, pero también ha sido empleada para el exterminio y la guerra, para controlar a los ciudadanos y para esquilmar la Tierra.

Como les ocurre a muchos otros científicos, Sánchez Ron confía más en la ciencia que en la política —algo muy razonable— y mucho más en los hechos que en las palabras o las especulaciones. *Deeds, not words* reza un viejo proverbio, bastante parecido por cierto al que esgrimen los políticos en tiempos electorales. *Nullius in verba*, «en las palabras de nadie», dice el lema inscrito en el escudo de la Royal Society de Londres. Las retóricas de objetividad inundan las declaraciones de quienes aspiran a representar sus objetos de estudio (los neutrones, los hechos del pasado) con la transparencia y la neutralidad de los instrumentos invisibles. Pero, para hacerlo, han de emplear millones de palabras. Son las paradojas de la representación, una tarea siempre pendiente de las estrategias de comunicación, los códigos culturales y las palabras de los otros, de todos los otros y especialmente de quienes trabajan con métodos y preocupaciones diferentes a los nuestros. *Totius in verba*. Quizá no sea la más desdeñable de las lecciones de la ciencia, esa empresa colectiva que consiste en aprender y preguntarse, en no darse por satisfecho con la primera respuesta y hasta cambiar también la pregunta o hacerse otras. En tratar de entender siempre o hasta donde nos sea posible las razones y los intereses de las palabras y los hechos de los otros.

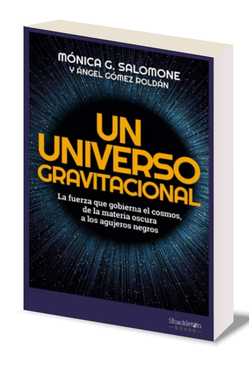
*—Juan Pimentel*
*Instituto de Historia (CSIC)*
*Madrid*

# NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*

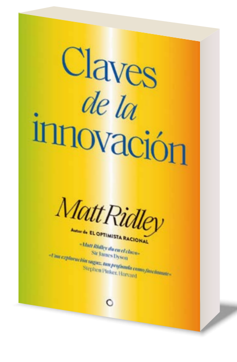




**100 QÜESTIONS PER IDENTIFICAR LA PSEUDOCIÈNCIA**
Jordi de Manuel y Jesús Purroy
Cossetània Edicions, 2021
ISBN: 978-84-1356-024-3
232 págs. (14,90 €)




**UN UNIVERSO GRAVITACIONAL**
**LA FUERZA QUE GOBIERNA EL COSMOS, DE LA MATERIA OSCURA A LOS AGUJEROS NEGROS**
Mónica G. Salomone y Ángel Gómez Roldán
Shackleton Books, 2021
ISBN: 978-84-1361-015-3
192 págs. (16,90 €)

**CLAVES DE LA INNOVACIÓN**
Matt Ridley
Antoni Bosch Editor, 2021
ISBN: 978-84-121765-1-3
384 págs. (25 €)




**EL *BLUES* DE LOS AGUJEROS NEGROS**
**Y OTRAS MELODÍAS DEL ESPACIO EXTERIOR**
Janna Levin
Capitán Swing, 2021
ISBN: 978-84-121354-5-9
240 págs. (19 €)




**POR QUÉ Y CÓMO SE HACE LA CIENCIA**
Pere Puigdomènech
Catarata/CISC, 2021
ISBN: 978-84-1352-206-7
136 págs. (12 €)




**MATERIA GRIS**
**LA APASIONANTE HISTORIA DEL CONOCIMIENTO DEL CEREBRO**
Ignacio Morgado
Ariel, 2021
ISBN: 978-84-344-3350-2
336 págs. (18,90 €)

Recopilación de Mark Fischetti

MAYO

# 1971

## El comienzo del tiempo

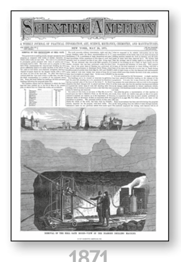
«En dos lugares muy distantes entre sí se han instalado equipos específicamente diseñados: en mi laboratorio de la Universidad de Maryland y en el Laboratorio Nacional de Argonne, cerca de Chicago. Durante los dos últimos años, los aumentos simultáneos en los valores ofrecidos por los detectores de ambos equipos evidencian pulsos de radiación gravitatoria procedentes del centro de nuestra galaxia. Esos descubrimientos han provocado no poca teorización y una gran polémica entre los astrofísicos. Es concebible que la fuente pueda ser algún objeto inusual, tal como una estrella de neutrones pulsátil. Es asimismo plausible que la masa del centro galáctico esté actuando como una lente gigante que enfoque la radiación gravitatoria procedente de una época más temprana del universo. La intensidad relativamente elevada que al parecer se observa podría estar indicándonos cuándo comenzó el tiempo. —Joseph Weber»



1971



1921



1871

# 1921

## Noticias de la ciencia

«En razón de que conviene que los ciudadanos puedan estar al corriente de las enseñanzas de la ciencia y reconocer el trabajo de los científicos serios, así como el discurso de los farsantes, es esencial que la gente entienda la ciencia moderna. Con el apoyo financiero del señor E. W. Scripps, cuyo nombre les será familiar a los lectores de varios centenares de diarios que usan su servicio de noticias, se ha creado una fundación para el Servicio Científico estadounidense. Este publicará libros y revistas, dirigirá conferencias y reuniones, producirá películas y, especialmente, ampliará la buena disposición y la capacidad de los diarios para tratar la información científica.»

## La radio en casa

«Estamos en el umbral de una nueva era de la radiocomunicación, concretamente de la radiodifusión de música para el hogar. La idea es situar estaciones radiofónicas en puntos centrales desde las que se emitirá música de concierto, además de charlas y conferencias, para que receptores compactos, desde distintos domicilios y clubes, capten las ondas. Ya hay varias estaciones en servicio y al menos una empresa de radio ha desarrollado un receptor constituido por una caja que encierra un altavoz de teléfono, de modo que la transmisión puede oírse en toda una habitación. Se cree que los principales fabricantes de equipos de radio conservarán los servicios de música y palabra para sus clientes.»

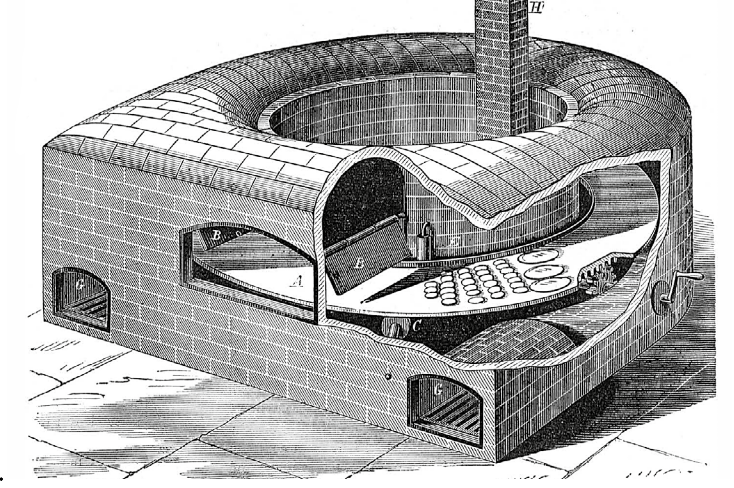
# 1871

## Horneado de alta calidad

«Nuestro grabado ilustra un horno de panadería de reciente invención que pretende combinar las ventajas del horno de tejería tradicional con las de los hornos mecánicos continuos. Estos no han logrado producir un pan de buen sabor y apto para el consumo. Se introduce la masa y, cuando la plataforma giratoria la retorna, se extrae por la puerta. Unas puertas oscilantes amortiguadas impiden la fuga del calor. Se afirma que este horno puede cocer cualquier cosa con la misma calidad que los de tejería. También se dice que ahorra combustible y mano de obra.»

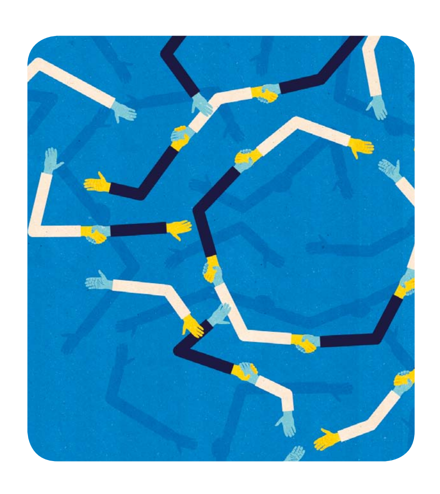
## Dentro de la mina de sal

«Las minas de sal más productivas del mundo son las de Wieliczka, en la Polonia austríaca, a poco más de quince kilómetros de Cracovia. Con una profundidad máxima de unos doscientos cincuenta metros, constan de siete niveles. El vehículo que nos bajó era una cesta de hierro, en la que nos sentamos con las piernas colgando por fuera, la cual pendía de unas cuerdas sujetas por arriba a un aro abrazado a un eje de hierro. Cuando nos detuvimos, uno de los portadores de linterna me precedió, y el otro se mantuvo detrás. Pasamos por un puente de madera, un tramo de escalera descendente y varios pasillos, todos tallados en la sal. La calidad de la sal varía ampliamente. La verde contiene entre seis y siete por ciento de arcilla, que destruye la transparencia. Otro tipo, la *spiza*, es cristalina, pero contiene arena; la totalmente pura *szybik* se encuentra en grandes masas cristalizadas. La mina produce unos 500.000 barriles al año, valorados en diez dólares cada uno. Se ignora cuándo se descubrieron las minas, aunque se sabe que se explotan desde hace casi nueve siglos. —Junius Henri Browne»



1871: El nuevo horno cuece el pan con eficiencia moderna pero al gusto tradicional.

*SCIENTIFIC AMERICAN*, VOL. XXIV, N.º 21, 20 DE MAYO DE 1871



MATEMÁTICAS

## Las matemáticas de las conexiones

*Kelsey Houston-Edwards*

La teoría de la percolación describe el comportamiento de muchos tipos de redes, desde las de conexiones entre teléfonos móviles hasta las de transmisión de enfermedades.



ASTRONOMÍA

## Nuevos horizontes de la óptica adaptativa

*Tony Travouillon, Céline D'Orgeville y Francis Bennet*

Una herramienta desarrollada para la astronomía encuentra nuevos usos relacionados con la basura espacial y la criptografía cuántica.

BIOLOGÍA

## Condensados biomoleculares, una nueva fuente de organización intracelular

*Viviane Callier*

Unas microgotas de biomoléculas se fusionan, dividen y disuelven en el interior de las células. Esta coreografía parece regular procesos vitales.

ARQUEOLOGÍA

## El origen del hogar

*Annalee Newitz*

Una ciudad de 9000 años de antigüedad revela cómo era la vida cuando empezamos a echar raíces.




**INVESTIGACIÓN Y CIENCIA**

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

**EDITA**

**Prensa Científica, S. A.**
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

**SCIENTIFIC AMERICAN**

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

**DISTRIBUCIÓN**

**para España:**
**LOGISTA, S. A.**
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

**para los restantes países:**
**Prensa Científica, S. A.**
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

**PUBLICIDAD**

**Prensa Científica, S. A.**
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

**ATENCIÓN AL CLIENTE**

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

**Precios de suscripción:**

| | España | Extranjero |
|---|---|---|
| Un año | 75,00 € | 110,00 € |
| Dos años | 140,00 € | 210,00 € |

**Ejemplares sueltos: 6,90 euros**

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

**COLABORADORES DE ESTE NÚMERO**

**Asesoramiento y traducción:**

Andrés Martínez: *Apuntes*; Javier Grande: *Apuntes*, *El LHC sigue viendo indicios de nueva física*, *Lunas extrasolares* y *Diez códigos informáticos que transformaron la ciencia*; Ernesto Lozano: *¿Se ha roto el modelo estándar?*; Rosa Pujol: *Incógnitas resueltas desde la publicación del genoma humano, hace 20 años*; Fabio Teixidó: *La curiosa ciencia de los cóndrulos*; Joandomènec Ros: *Los estragos de la contaminación lumínica*; Miguel A. Vázquez Mozo: *Plancton cósmico*; Alfredo Marcos: *El motor estético de la física*; Lorenzo Gallego: *Contra las teorías conspirativas*; Pedro Pacheco: *Las epidemias que moldearon el mundo*; Pedro Castiñeiras: *Tectónica de placas en directo*; J. Vilardell: *Hace...*





ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova
17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España